

**Quecksilber- und Quecksilberdampffreisetzung aus amalgamgefüllten
Prüfkörpern durch Putzabrasion unter in-vitro Bedingungen.**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

**Vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Schiller-Universität Jena**

**von Martin Jendrek,
geboren am 08. Januar 1979 in Gera**

Gutachter

1.

2.

3.

Tag der öffentlichen Verteidigung:

Abkürzungsverzeichnis

Einheiten

°C	Grad Celsius	Temperatureinheit
a	Jahr	
cm	Zentimeter	hundertster Teil des Meters
cm ²	Quadratzentimeter	Fläche von 1 mal 1 Zentimeter
g	Gramm	
h	Stunde	
Hz	Hertz	Einheit für Frequenz in 1/min
kg	Kilogramm	Tausend Gramm
l	Liter	Raumeinheit von 0,1 mal 0,1 mal 0,1 Meter
m ³	Kubikmeter	Raumeinheit von 1 mal 1 mal 1 Meter
Masse%	Masseprozent	Prozentualer Masseanteil eines Stoffes an der Gesamtmasse in 1 Teilen von 100.
min	Minute	
ml	Milliliter	tausendster Teil des Liters
mm	Millimeter	tausendster Teil des Meters
mm ²	Quadratmillimeter	Fläche von 1 mal 1 Millimeter
N	Newton	Einheit für Kraft
ng	Nanogramm	milliardenster Teil eines Gramms
p		Formelzeichen für die Wahrscheinlichkeit des Nichtzutreffens einer Aussage, ohne Einheit
Pa	Pascal	Einheit für Druck in N/m ²
ppm	parts per million	Teile von einer Million
sek	Sekunde	
t	Tonne	Tausend Kilogramm
V	Volt	Einheit für elektrische Spannung
μA	Mikroampere	Einheit für den Stromfluss
μg	Mikrogramm	millionster Teil eines Gramms
μm	Mikrometer	millionster Teil des Meters

Eigene Abkürzungen

AAS	Atom-Absorptions-Spektrometrie	
Abb.	Abbildung	
Ag	Silber	
Cu	Kupfer	
EEG	Elektroenzephalogramm	Registrierung elektromagnetischer Potentialschwankungen des Gehirns
Hg	Quecksilber	
Hg ⁰	atomares Quecksilber	ungeladenes Quecksilber, gasförmig
Hg ⁺⁺	ionisiertes Quecksilber	zweifach positiv geladene Quecksilberionen, gelöst
Krea	Kreatinin	
PMMA	Polymethylmethacrylat	Kunststoff, Plexiglas
PVC	Polyvinylchlorid	Kunststoff
RDA	Radio-Dentin-Abrasion	
RNA	ribonukleinacid	englisch, Ribonukleinsäure, intrazelluläres Erbmateri- al und Genprodukt
S	Schwefel	
Sn	Zinn	
Tab.	Tabelle	
TWI	tolerable weekly intake	englisch, tolerierbare Wöchentliche Aufnahme
WHO	World Health Organisation	englisch, Weltgesundheitsorganisation
Zn	Zink	

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	3
2.1	Geschichtliche Entwicklung des Zahnamalgams	3
2.2	Zahnamalgam	5
2.2.1	Zusammensetzung und Eigenschaften	5
2.2.2	Normbeschreibung	7
2.2.3	Indikationen für Amalgam als Füllungswerkstoff	8
2.2.4	Gegenanzeigen für Amalgam	9
2.2.5	Versorgung der Bevölkerung mit Zahnamalgam	10
2.3	Quecksilber	11
2.3.1	Chemische Eigenschaften	11
2.3.2	Vorkommen und Belastungsquellen	11
2.3.3	Freisetzung von Quecksilber aus Amalgam	12
2.3.4	Aufnahme und Verteilung im Organismus	13
2.3.5	Toxikologie beim Menschen	16
2.3.6	Amalgamallergie	20
3	Zielstellung	22
4	Material und Methode	23
4.1	Verwendete Amalgame	23
4.2	Versuchsaufbau	24
4.2.1	Prüfkörper	24
4.2.1.1	Allgemeine Herstellungsrichtlinien	24
4.2.1.2	Variationen bei der Herstellung	26
4.2.2	Putzmaschine	29
4.2.3	Halterung der Prüfkörper	31
4.2.4	Bürstenköpfe	33
4.2.5	Putzmedium	35
4.2.6	Absauganlage	37
4.3	Versuchsablauf	38
4.3.1	Putzversuch	38

4.3.2	Reinigung und Leerwerte	39
4.3.3	Messmethode	40
4.4	Statistische Auswertung	41
5	Ergebnisse	42
5.1	Leerwertmessungen	42
5.2	Hauptversuch	42
5.2.1	Legierungsart	42
5.2.1.1	Quecksilber im Putzmedium	42
5.2.1.2	Quecksilberdampf	43
5.2.2	Verarbeitungsqualität	44
5.2.2.1	Quecksilber im Putzmedium	44
5.2.2.2	Quecksilberdampf	46
5.2.3	Oberflächenbearbeitung	47
5.2.3.1	Quecksilber im Putzmedium	47
5.2.3.2	Quecksilberdampf	48
5.2.4	Alter der Prüfkörper	49
5.2.4.1	Quecksilber im Putzmedium	49
5.2.4.2	Quecksilberdampf	51
5.2.5	Entwicklung der Quecksilberdampfwerte nach Versuchsende	53
6	Diskussion	55
6.1	Erhebung der Messwerte	55
6.1.1	Messwerte der Putzflüssigkeiten	55
6.1.2	Messwerte der Absaugung	56
6.2	Zusammenhang der Messwerte der Absaugung und der Putzflüssigkeit	57
6.3	Einfluss der Legierung auf die Quecksilberfreisetzung	59
6.4	Einfluss des Stopfvorganges auf die Quecksilberfreisetzung	62
6.5	Einfluss der Nachbearbeitung	64
6.6	Einfluss des Alters der Amalgamfüllungen	65
6.7	Quecksilberdampfabgabe nach Versuchsende	67
6.8	Kalkulation der Mehrbelastung durch das Zähneputzen	70
6.9	Toxikologische Bewertung der Belastung mit Quecksilber	74
6.10	Empfehlung zur Senkung der Belastung durch die Mundhygiene	75

7	Schlussfolgerungen	77
8	Literaturnachweis	79
9	Anhang	103

1 Zusammenfassung

Diese in-vitro-Studie sollte zeigen, in welcher Weise die Mundhygienemaßnahmen insbesondere beim Vorliegen von Amalgamfüllungen zur Belastung des menschlichen Organismus durch Quecksilber beitragen kann. Dabei sollte gezeigt werden, welchen Einfluss das verwendete Amalgam, die Füllungsherstellung sowie die Nachbearbeitung auf die Quecksilberbelastung ausüben.

Dazu wurden 66 amalgamgefüllte Prüfkörper hergestellt und der simulierten Zahnreinigung mit Bürsten und Putzflüssigkeit aus Wasser und Zahnpaste unterzogen. Es kamen elf verschiedene Verarbeitungsweisen bei der Herstellung der Prüfkörper unter Variation der verwendeten Amalgame, des Stopfdruckes, des verwendeten Instrumentariums sowie der Nachbearbeitung zur Anwendung.

Die Prüfkörper mit einer freien Amalgamoberfläche von je $50,3 \text{ mm}^2$ wurden von 2 ml einer Zahnpastenaufschlemmung aus „Meridol[®]“-Zahnpasta und Wasser umspült, wobei ein mit einer Auflage von 200 g beschwerter Zahnbürstenkopf einer mittelharten Bürste innerhalb von 50 Sekunden 100 lineare Putzbewegungen ausführte. Es wurden die Quecksilberfreisetzung in die Putzflüssigkeit sowie die Quecksilberdampfentwicklung während und nach dem Versuch gemessen und ausgewertet.

Die Daten waren reproduzierbar und bei der Anzahl der vorhandenen Stichproben geeignet, statistisch signifikante Aussagen zu ermöglichen.

Die Quecksilberfreisetzung in die Putzflüssigkeiten lagen zwischen $11,49$ und $26,29 \text{ ng/mm}^2$ Füllungsoberfläche, der Median bei $19,73 \text{ ng/mm}^2$. Simultan wurde eine Quecksilberdampfentwicklung von $0,15$ bis $0,77 \text{ ng/(min}\cdot\text{mm}^2)$ mit einem Median von $0,30 \text{ ng/(min}\cdot\text{mm}^2)$ beobachtet.

Dabei wurde eine Abhängigkeit der Quecksilberfreisetzung vom Alter der Füllungen, dem verwendeten Stopfinstrument, sowie vom Vorhandensein einer Politur gefunden. Während der Lagerung der Prüfkörper sank die Quecksilberdampffreisetzung innerhalb von 14 Tagen um 30 Prozent. Durch die Hochglanzpolitur konnte die Quecksilberdampffreisetzung sogar um 50 Prozent gesenkt werden. Ein geringer Einfluss zeigte sich beim verwendeten Stopfinstrument und bei der Darreichungsform. Wurde ein Kugelstopfer verwendet, kam es zur stärkeren Streuung und leichten Erhöhung der Quecksilberdampffreisetzung der Prüfkörper gegenüber den mit planem Stopfer hergestellten Füllungen. Das manuell dosierte Amalgam Duragam[®] zeigte in diesem Versuch die höchste Freisetzungsrates auf Grund des feuchten Anmischverhältnisses.

Unbeeinflusst blieb die Quecksilberfreisetzung vom Anpressdruck bei der Füllungslegung sowie von der Legierungsart des Amalgams. Weder bei der Erhöhung des Stopfdruckes auf den zehnfachen Wert, noch bei der Verwendung der gamma-2-haltigen Legierung Dentargam® konnten Unterschiede in den Quecksilberfreisetzungen gefunden werden.

Nach dem Versuchsende konnte über einen Zeitraum von zwei Stunden eine erhöhte Quecksilberdampffreisetzung beobachtet werden. Diese lag um $0,55 \text{ ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ über der Quecksilberdampffreisetzung unter Ruhebedingungen und erreichte nach 90 Minuten wieder den Ausgangswert vor dem Putzversuch.

Durch geeignete mathematische Modelle für in vivo -Verhältnisse konnte eine durch die Reinigung amalgamgefüllter Zähne entstehende wöchentliche Belastung von $9,6 \text{ } \mu\text{g Hg}$ errechnet werden. Unter Berücksichtigung aller Quellen für eine Belastung mit Quecksilber liegt die wöchentliche Gesamtquecksilberbelastung von Amalgamträgern bei $149 \text{ } \mu\text{g Hg}$. Diese liegt unterhalb der von der WHO angegebenen tolerierbaren wöchentlichen Quecksilberzufuhr. Auch bei exzessiver Mundhygiene wird die zur Ausbildung minimaler Symptome notwendige Quecksilberaufnahme nicht erreicht. Eine Gesundheitsgefährdung oder Schädigung ist daher nicht zu erwarten.

Auch im Hinblick auf die zusätzliche Belastung des Körpers mit Quecksilber durch die Stimulation der Amalgamfüllungen während des Zähneputzens liegt kein Grund vor, auf Amalgam als Füllungsmaterial zu verzichten.

2 Einleitung

2.1 Geschichtliche Entwicklung des Zahnamalgams

Das Material Amalgam ist eines der meistverwendeten und ältesten Füllungsmaterialien in der Zahnheilkunde. Die einfache aber erfolgreiche Anwendung sowie die sehr gute Kosten-Nutzen-Relation auf der einen und die toxikologische Bedenklichkeit des Inhaltsstoffes Quecksilber auf der anderen Seite führen schon seit über 150 Jahren zu heftigen Diskussionen.

Als Zahnfüllungsmaterial wurde es bereits im Jahre 659 nach Christi in der „materia medica“ durch den Chinesen Sukung beschrieben. Es bestand aus 25 Teilen Silber und 900 Teilen Zinn, welches mit 100 Teilen Quecksilber zu einer knetbaren Masse gemischt wurde (Riethe 1980). Im 17ten Jahrhundert vermischte Johannes Stocker Quecksilber mit „grünem Vitriol“, einem Kupfersulfat, und nannte es Amalgam (Riethe 1980).

Charles Bell entwickelte 1819 in England eine Rezeptur auf Basis von Silber und Quecksilber zur Herstellung eines „royal mineral succadaneum“ (Gainsford 1983), Auguste Onosime Taveau nutzte 1840 Späne einer Silbermünze und Quecksilber, um ein Zahnfüllungsmaterial herzustellen (Babendererde et al. 1970). Die kommerziellen Möglichkeiten einer Füllung aus einem billigen und leicht zu verarbeiteten Material erkannte die Familie Crawcor, die es nach Amerika brachte. Oft wurde jedoch keine Präparation der kariösen Läsionen durchgeführt, eine einheitliche Rezeptur existierte nicht und die Füllungen waren oft qualitativ minderwertig (Molin 1992). Unregelmäßige Zusammensetzungen führten zu hohen Expansionswerten, langen Abbindezeiten und minder belastbaren Füllungen. Hohe Misserfolgsraten wie Füllungsverlust, Zahnfrakturen und Endodontiden durch fehlende Excavation waren die Folgen. Kritik am Material Amalgam wurde laut, der erste „Amalgamkrieg“ begann. Eine Vielzahl von Krankheiten wurden dem bekanntermaßen giftigen Quecksilber angelastet. Amalgam verwendete nach Meinung der Kritiker nur der, der zu besseren Füllungen nicht in der Lage war. 1843 mussten alle Mitglieder der American Society of Dental Surgeons den Verzicht auf Amalgam als Füllungsmaterial geloben (Gainsford 1983).

Erst als Greene Vardiman Black 1896 Regeln für die Präparation einer mit Amalgam zu versorgenden Kavität und eine qualitativ hochwertige Rezeptur für ein ausreichend hartes Amalgam ohne Volumenänderung entwickelte, wurde Amalgam als Füllungsmaterial anerkannt (Jørgensen 1977). Auch Adolf Witzel erreichte durch seine Forschungen über die Anwendung von Amalgam im Seitenzahngebiet eine steigende Anerkennung des Materials (Riethe 1980, Witzel 1899).

1919 erfolgte erstmals die Festlegung der prozentualen Anteile der Bestandteile von Amalgam in einem Standard. Dieser wurde zur Spezifikation Nr.1 der American Dental Association weiterentwickelt. 1963 entwickelten Innes und Youdelis ein Amalgam, welches keine γ 2-Phase enthielt. Dieses verdrängte später das bis dahin hauptsächlich verwendete konventionelle Amalgam.

Die Bedenken über die Verwendung des toxischen Elementes Quecksilber kamen nach 1900 wieder auf, diesmal in Deutschland. Alfred Stocker schrieb bereits 1928 über „Die Gefährlichkeit des Quecksilberdampfes und der Amalgame“. Zu ernsthaften Reaktionen in Form von öffentlichen Diskussionen und ersten Ablehnungen des Materials durch Patienten kam es jedoch erst in den siebziger Jahren. Es entbrannte erneut eine hitzige Debatte über die Giftigkeit von Zahnamalgam, welche sich bis heute hinzieht (Riethe 1980).

Einige Autoren sehen die Giftigkeit des Materials als erwiesen an (Wassermann et al. 1997). Viele Krankheiten, angefangen mit Kopfschmerz bis hin zu Multipler Sklerose, werden Zahnamalgam angelastet. Ein führender Kritiker des Zahnamalgams schreibt: „Jetzt ist es bewiesen, Amalgam macht krank, und ein Amalgameinsatz ist als ein ärztlicher Kunstfehler zu betrachten“, es wird sogar der ursächliche Zusammenhang mit Karies und Periodontitis unterstellt (Mayer et al. 1995, Daunderer 1999, Ely et al. 1999). Galvanische Effekte werden diskutiert und für neuronale Symptome und Gingivitiden verantwortlich gemacht (Kramer 1992, Raue 1992, Swartzendruber 1993). Vielfältige schwer objektivierbare Symptome werden der geringen Langzeitbelastung zugeschrieben. (Knolle 1992, Mayer et al. 1995, Wassermann et al. 1997, Ely et al. 1999, Wolff et al. 1983). Sogar schwere Vergiftungsfälle mit Todesfolge werden angeführt (Mayer et al. 1995). Der vorläufige Höhepunkt der Kontroverse wurde mit dem Kieler Amalgamgutachten erreicht. In dem Bericht wird zusammenfassend festgestellt: „Amalgam als Zahnfüllungsmaterial hat in erheblichem Ausmaß gravierende, zum Teil auch nach dem Ausbohren der Füllungen persistierende und sogar irreversible Gesundheitsschädigungen verursacht“ (Wassermann et al. 1997). Auch in einer Übersicht zu aktuellen Arbeiten zu möglichen schädlichen Wirkungen von Amalgam wird dort auf die Möglichkeit gravierender Gesundheitsschäden hingewiesen.

Andere Autoren verfechten die Unbedenklichkeit des Füllungsmaterials. Sie argumentieren, dass die Freisetzung von Quecksilber aus Amalgamfüllungen nicht ausreicht, um toxikologische Relevanz zu besitzen (Schiele 1998, Schweinsberg 2002). Es existieren keine ausreichend beschriebenen Anzeichen für eine krank machende Wirkung von Amalgam, ein Zusammenhang zwischen einer Krankheitsanfälligkeit und dem Tragen von Amalgamfüllungen kann nicht nachgewiesen werden (Ekstrand et al. 1998, Staehle 1992). Auch ein Zusammenhang zwischen chronischen Leiden wie Multipler Sklerose, Morbus Alzheimer, Chronic Fatigue Syndrom und

anderen wird als spekulativ und nicht bewiesen abgelehnt (Lübbe und Wüthrich 1997, Fischer 1997, Staehle 1992), das Krankheitsbild des Mikromerkuralismus wird als „bestenfalls fragwürdig“ (Halbach et al. 1997) bezeichnet. Der Füllungswerkstoff Amalgam hat sich als qualitativ hochwertiger Werkstoff bewährt, er ist der „bestuntersuchte Werkstoff in der Zahnmedizin“ (Rateitschak 1992), derzeit ist ein vollständiger Ersatz des Materials in Hinblick auf Festigkeit, Langlebigkeit und Kosten nicht möglich (Wirz et al. 1990, Staehle 1992).

Die Kontroverse über die mögliche Gefährlichkeit von Amalgam beruht auf einer unterschiedlichen Auslegung der bekannten Fakten (Lübbe und Wüthrich 1997). Diese Diskussion, welche im zunehmenden Masse in den öffentlichen Medien geführt wurde, hat viele Patienten und Ärzte verunsichert. Die kritische Auseinandersetzung mit dem Material und weitere Erforschung seiner möglichen Auswirkungen auf den menschlichen Organismus ist daher unerlässlich.

2.2 Zahnamalgam

2.2.1 Zusammensetzung und Eigenschaften

Zahnamalgam besteht aus Partikeln einer Legierung und flüssigem Quecksilber. Bei der Trituration werden beide Bestandteile vermischt, es entsteht eine plastische Masse, die nach 3 bis 6 Minuten aushärtet.

Die Partikel entstehen aus einer Legierung, die in der Regel aus Silber, Kupfer und Zinn besteht. Ihre mengenmäßige Zusammensetzung bestimmt die Art des Amalgams.

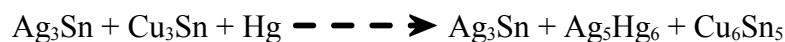
Wird für die Legierung Kupfer verwendet, entsteht mit Quecksilber das Kupferamalgam. Es besteht aus 30% Kupfer und 70% Quecksilber. Durch die Abgabe von Kupfer während der Verweildauer im Munde des Patienten wirkt es bakteriostatisch, wodurch es in der Kinderzahnheilkunde sowie im kariesaktiven Gebiss empfohlen wurde. Es zählt jedoch nicht zu den modernen Amalgamen, seine Verwendung ist auf Grund der starken Korrosion und der schwierigen Verarbeitung unter Entwicklung starker Quecksilberdämpfe obsolet (Jørgensen 1977).

Konventionelle γ_2 -haltige Amalgame entstehen aus maximal 50 Masse% Silber; 13 Masse% Zinn, 1,4 Masse% Kupfer, 1 Masse% Zink und 50 Masse% Quecksilber. Das Silber formt mit dem Quecksilber die γ_1 -Phase Ag_3Hg_4 , das Zinn formt mit dem Quecksilber die γ_2 -Phase Sn_8Hg .



Die γ_2 -Phase ist sehr korrosionsanfällig und wird im Laufe der Zeit aus der Amalgamfüllung freigesetzt. Durch die erneute Bindung des frei werdenden Quecksilbers führt dies zur merkuroskopischen Expansion vor allem im Randbereich der Füllung. Dieser wächst aus der Kavität heraus, wird vom Rand abgebogen und später durch die Kaukraft abgesprengt, es kommt zu undichten Randverhältnissen. Des weiteren neigen konventionelle Amalgame zum Fließen der Füllung unter Kaubelastung. Diese Eigenschaft wird als Creep bezeichnet. Dieser, die starke Verfärbung, die undichten Randverhältnisse und die geringe Festigkeit des Werkstoffs haben dazu geführt, dass das konventionelle γ_2 -haltige Amalgam, ebenso wie das Kupferamalgam, nicht mehr verwendet und vertrieben wird.

1963 entwickelten Innes und Youdelis durch Erhöhung des Kupferanteils in der Feilung auf 10% bis 20% sowie durch Senkung des Zinnanteils unter 18% das erste moderne gamma-2-freie Amalgam. Die Pulver dieser Amalgame bestehen aus Legierungen mit >65% Silber, <29% Zinn, >6% Kupfer, <2% Zink sowie <3% Quecksilber. Es gibt höher kupferhaltige Amalgame mit <18% Kupferanteil und hochkupferhaltige Amalgame mit >18% Kupfer. Das Kupfer reagiert bei der Abbindung mit dem Zinn, eine eventuell gebildete γ_2 -Phase wird dabei unter Bildung von Cu_5Sn_6 wieder abgebaut.



Diese Amalgame zeigen durch das Fehlen der korrosionsanfälligen γ_2 -Phase Sn_8Hg ein günstigeres Korrosionsverhalten (Mahler et al. 1975). Es entsteht eine Legierung, die keine merkuroskopische Expansion, eine höhere Biegefestigkeit und einen geringen Creep aufweist. Sie werden beständig weiterentwickelt, so soll durch Zusatz von Indium oder Antimon die Quecksilberfreisetzung verringert werden und die Rückbildung der γ_2 -Phase beschleunigt werden (Weiland und Nossek 1991).

Bei der Herstellung eines Pulvers aus der Legierung kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz: Das Zerspanen von Barren sowie die Verdüsung der flüssigen Legierungen. Es entstehen so nach Stoian und Meyer vier verschiedene Amalgame Typ I bis IV (siehe Tabelle 1) (Stoian und Meyer 1980).

Die Form und Größe der Partikel ist ausschlaggebend für den Stopfdruck, der notwendig ist, um eine porenarme und gut an die Kavität adaptierte Füllung zu erhalten. Sphärische Amalgame sind leichter zu kondensieren. Beim Stopfen des Amalgams entfällt dabei die Notwendigkeit, vermehrt Quecksilber zuzugeben, um das Material gleitbarer zu machen. Sie ergeben ein druckfesteres und porenarmes Amalgam, Kugelamalgame sind reinen Splitteramalgame überlegen (Venz und Dermann 1984, Christ und Riethe 1972). Splitteramalgame benötigen einen

höheren Stopfdruck, zeigen jedoch eine bessere Adaptation an die Kavitätenwand. Mischungen der Partikelformen ermöglichen eine gute Einstellung des Verhaltens während der Kondensation des Amalgams.

Tabelle 1: Einteilung der Amalgame in vier Gruppen nach Stoian und Meyer (1980).

Typ 1	Kupferanteil unter 6%
	a) Splitteramalgam
	b) Sphärisches Amalgam
Typ II	Kupferanteil unter 6%, Mischung aus Splittern Ag_3Sn und sphärischen Partikeln Cu_3Sn
Typ III	Kupferanteil 12-18%, Mischung aus Splitter Ag_3Sn und Kugeln Cu_3Sn
Typ IV	Kupferanteil 12-30%
	a) Sphärisches Amalgam
	b) Sphäroides Amalgam
	c) Splitteramalgam
	d) Mischung Splitter Ag_3Sn und Kugel Cu_3Sn

Die Legierungen können voramalgamiert werden, sie enthalten dann bereits vor der Trituration bis zu 3% Quecksilber. Dadurch ist es möglich, die Benetzung mit flüssigem Quecksilber und damit die Trituration zu vereinfachen und zu beschleunigen.

2.2.2 Normbeschreibung

Zur Sicherung einheitlicher Qualitätsstandards wurden Spezifikationen erstellt, in denen die Zusammensetzung der Legierungen sowie Standards zur Prüfung der Eigenschaften des Amalgams festgelegt wurden. Der Hersteller hat die Voraussetzungen zur Einhaltung der Maßgaben sicherzustellen.

Erstmals legte 1919 die USA eine Norm für Silber-Zinn-Legierungen fest, 1928 wurde der Standard von der amerikanischen Zahnärztervereinigung übernommen, es entstand die Bundespezifikation 356. 1931 wurde die Spezifikation für Zahnamalgame festgelegt, welche 1934 von der ADA anerkannt wurde. 1957 übernahm die Federation Dentarie International die Spezifikation als Spezifikation Nr 1, der Bundesverband der deutschen Zahnärzte führte 1965 die Spezifikation mit geringen Änderungen ein (Jørgensen 1977, Gainsford 1983). Sie wurde später

mehrfach überarbeitet, um Neuentwicklungen wie die Gamma-2-freien Amalgame zu berücksichtigen.

Tabelle 2: Angaben der Legierungsbestandteile im Pulver für Zahnamalgame. In Spuren beigemischte Bestandteile werden nicht aufgeführt.

Legierungsbestandteil	Anteil Gewichts% im Pulver
Silber	40 minimal
Zinn	32 maximal
Kupfer	30 maximal
Zink	2 maximal
Quecksilber	3 maximal

Ein Amalgam, dass am Patienten als Füllungsmaterial verwendet wird, muss den Maßgaben nach DIN EN 21559 (siehe Tabelle 2) entsprechen. Die Gesamtverunreinigung durch andere Nichtedelmetalle darf 0,1% nicht übertreffen (DIN EN 1991).

Weicht sie von diesen ab, so muss sichergestellt sein, dass sie in mindestens einem Punkt besser aber in keinen der Punkte schlechter ist als andere Amalgame.

- Die Verarbeitungszeit soll für schnell härtende Amalgame maximal 3 Minuten, für normalhärtende maximal 6 Minuten betragen.
- Eine Stunde nach Legen soll die Druckfestigkeit mindestens 50 N/mm², nach 24 Stunden mindestens 300 N/mm² betragen.
- Die Volumenänderung während des Abbindens darf nach 24 Stunden -0,1% und +0,2% nicht überschreiten.
- Die Höchstgrenze für den Creep ist auf max. 3% nach 7 Tagen festgelegt.

(DIN EN 1991)

Um eine Amalgamfüllung mit diesen Eigenschaften zu erhalten, muss der Zahnarzt auf die genaue Einhaltung der Triturationszeiten sowie auf die Anwendung der optimalen Stopfmethode achten (Wirz et al. 1990).

2.2.3 Indikationen für Amalgam als Füllungswerkstoff

Modernes Amalgam ist ein Werkstoff, der hohen Belastungen und Biegebeanspruchungen standhält. Daher ist es als Füllungswerkstoff in den kautragenden Regionen des Seitenzahngebietes in Kavitäten der Klasse I und II indiziert. Durch die Verbesserung der Materialeigenschaften können auch größere Defekte der Hartschubstanz sowie der Ersatz einzelner

Höcker mit Amalgam erfolgen. Auf Grund der guten Dimensionsstabilität ist Amalgam in nicht schmelzbegrenzten Füllungen anwendbar. Auf Grund der geringen Kantenfestigkeit und Belastbarkeit gegenüber den Gussmetallen ist es für den Kronenaufbau allenfalls temporär geeignet (Stahle 1992, Riethe 1985).

Durch seine silbergraue Farbe kann es nicht in ästhetisch anspruchsvollen Bereichen der Frontzähne verwendet werden.

Zur Zeit ist die Anwendung von Amalgam rückläufig. Gründe dafür sind das Vordringen alternativer Füllungswerkstoffe wie Komposite in den Indikationsbereich der Amalgamfüllung sowie steigende Ästhetikansprüche und Bedenken gegen Amalgam seitens der Patienten (Heidemann 2001). Ein vollwertiger Ersatz der Amalgamfüllung ist mit diesen Werkstoffen jedoch nicht möglich. Materialeigenschaften wie Dimensionsstabilität bei der Härtung sowie Biegefestigkeit und Abrieb sind vor allem für größere Restaurationen im kautragenden Bereichen nicht ausreichend (Wirz 1991). Ein Werkstoff mit vergleichbaren Eigenschaften und einem für das Gesundheitswesen tragbarem Preis-Leistungs-Verhältnis steht derzeit nicht zur Verfügung (Heidemann 2001, Hickel und Klaiber 1992a). Die kostenmäßig vergleichbaren Komposite zeigen einen höheren Abrieb sowie eine hohe Polymerisationsschrumpfung mit Spaltbildungen (Hickel und Klaiber 1992a,b). Ihre Anwendung in dentinbegrenzten Kavitäten ist derzeit nicht in Langzeittests gesichert, es zeigt sich eine starke Abnahme des Dentinhaftverbundes bereits nach einem Jahr auch bei vollständig schmelzbegrenzten Läsionen (Koshiro et al 2004). Ein vollständiger Ersatz der Amalgamfüllung im Seitenzahngebiet ist nicht möglich (Meyer et al. 1989).

Indikationen wie retrograde Wurzelfüllungen, zervikale Füllungen, Stumpfaufbauten sowie Füllungen im Milchgebiss müssen als obsolet bezeichnet werden, da hier durch Komposite, Glasionomerezemente und ähnliche Werkstoffe ausreichende und sogar bessere Ergebnisse erzielt werden können (Hickel und Klaiber 1992b).

2.2.4 Gegenanzeigen für Amalgam

Das ehemalige Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte hat am 01.04.1995 eine Liste von Anwendungseinschränkungen ausgegeben. Darin werden folgende Einschränkungen zur Anwendung von Amalgam angegeben:

1. Die Allergie auf Quecksilber gilt wie bei allen anderen Arzneimitteln und Werkstoffen als absolute Kontraindikation.

2. Für Stillende und Schwangere wird die Empfehlung ausgesprochen, eine zahnmedizinische Behandlung nur im Rahmen der Notversorgung durchzuführen, um den physischen Stress sowie die Belastung durch Fremdstoffe möglichst gering zu halten. Der Verzicht auf Amalgam wird empfohlen, zur Restauration sollen nur Glasionomerzemente verwendet werden.
3. Füllungen, die Kontakt zu Metallen anderer Legierung haben, sollen nicht aus Amalgam bestehen, um elektrisch induzierte Korrosionsvorgänge zu verhindern.
4. Die Nierenfunktionsstörung ist eine relative Kontraindikation, da die Niere als Zielorgan für Quecksilber gilt.
5. Vor dem Einsatz bei Kindern muss genau geprüft werden, ob kein anderes Material in Frage kommt, da Kinder empfindlicher auf Quecksilber reagieren können.

Die Empfehlung, bei Schwangeren auf Amalgam zu verzichten, kann jedoch derzeit nicht begründet werden, sie hat lediglich vorsorglichen Charakter (Wirz 1991, Schiele et al. 2000).

Die Entscheidung über einen Einsatz von Amalgam muss der Zahnarzt nach Absprache mit dem Patienten fällen. Er ist dabei verpflichtet, mögliche Alternativen anzubieten (Konsensuspapier 1997).

2.2.5 Versorgung der Bevölkerung mit Zahnamalgam

Die Versorgung der Bevölkerung mit Amalgam beträgt ca. 90%. In den USA ist die Amalgamfüllung die häufigste Füllung des Seitenzahngebietes, in Skandinavien bestehen 30% aller Füllungen aus Amalgam (Schmalz und Thonemann 1999). Laut Bundesmanteltarifvertrag ist Amalgam in Klasse-II-Kavitäten obligat (Hellwig et al. 1990). Der Bedarf an neuen Amalgamfüllungen beträgt in Deutschland ca. eine Füllung je Person und Jahr (Schiele 1996), so werden von 80% der deutschen Zahnärzte ca. 500 bis 1500 Amalgamfüllungen im Jahr gelegt. Es ist jedoch seit einigen Jahren ein rückläufiger Trend zu verzeichnen (Heidemann 2001).

Eine Amalgamfüllung mit drei Flächen im Prämolaren hat eine Oberfläche von 52 mm² bis 53 mm², und eine Masse von ca. 2 g (Mayer und Gantner 1989, Mayer et al. 1995). Sind alle Sechsjahrmolaren mit dreiflächigen sowie alle zweiten Prämolaren mit zweiflächigen Füllungen versorgt, resultiert dabei eine Amalgamfläche von 380 mm² (Mayer und Gantner 1989). Weiland und Nossek geben jedoch eine Gesamtfläche von 10 cm² an (Weiland und Nossek 1991).

2.3 Quecksilber

2.3.1 Chemische Eigenschaften

Quecksilber ist ein Element der zweiten Nebengruppe mit der Ordnungszahl 80. Seine Atommasse beträgt 200,59 g, es hat bei 0 °C eine Dichte von 13,6 g/cm³. Der Siedepunkt von Quecksilber liegt bei 357,3 °C, es erstarrt bei –38,9 °C. Der Verdampfungsdruck liegt bei 0,17 Pa, die Sättigung in Luft beträgt bei 20 °C 14000 ng/m³. Atomarer Quecksilberdampf verbleibt ca. ein Jahr in der Atmosphäre (Schiele 1998, Clarkson 1997).

Quecksilber bildet Salze, diese sind hochgradig toxisch und korrosiv. Das wichtigste in der Natur vorkommende Quecksilbersalz ist das Zinnober HgS. Des Weiteren geht Quecksilber Verbindungen mit organischen Stoffen ein, das häufigste Produkt ist das toxische Methylquecksilber.

Zur Trituration von Legierungspulver zur Herstellung einer zahnärztlichen Füllung verwendetes Quecksilber muss eine hohe Reinheit haben, es soll sich auf dem frischen Quecksilber keine Oxidschicht bilden (Jørgensen 1977, DIN EN 1991).

2.3.2 Vorkommen und Belastungsquellen

Quecksilber wird kontinuierlich aus der Erdkruste, durch vulkanische Aktivität und aus dem Meer freigesetzt. Die Menge des aus diesen Quellen freigesetzten Quecksilbers beträgt 120000 t/a bis 178000 t/a (Schweinsberg 2002). Eine weitere Freisetzung von Quecksilberdampf in die Erdatmosphäre erfolgt durch die Industrie, so werden durch die Erzaufbereitung jährlich bis 20000 t in die Atmosphäre abgegeben, die restliche Industrie setzt bis 10000 t/a frei, durch Verbrennung von fossilen Brennstoffen kommen noch einmal 8000 t/a hinzu.

Dies führt zu einer Hintergrundbelastung von 2 ng/m³, in Ballungsgebieten bis 10 ng/m³. Eine weitere Belastung für den Menschen mit Quecksilber erfolgt durch die Nahrung, speziell durch den Verzehr von Fisch, welcher Methylquecksilber enthält. Quecksilber wird durch die Nahrungskette konzentriert, Hai enthält daher die höchsten Konzentrationen, jedoch auch andere Fische wie Heilbutt, Thunfisch oder Hecht sind belastet (Schiele 1998, Schweinsberg 2002). Die tägliche Aufnahme von Quecksilber mit der Nahrung beträgt bis zu 7 µg.

Für Amalgamträger kommt die Belastung mit Quecksilber aus den Füllungen hinzu, welche bei Personen mit durchschnittlichem Fischkonsum die Belastung aus allen anderen Quellen übersteigt (Begerow et al. 1994, Lübke und Wüthrich 1997).

Einige Personen werden weiterhin durch Quecksilber in Raumfarbe, Hautaufhellern, Antiseptika oder durch deren Beruf belastet. Diese Belastungen können das Ausmaß der durchschnittlichen Quecksilberbelastung weit übersteigen, und werden zur Einschätzung und Erforschung der toxischen Wirkungen von Quecksilber herangezogen.

2.3.3 Freisetzung von Quecksilber aus Amalgam

Die Abgabe von Quecksilber aus einer Amalgamfüllung ist von mehreren Faktoren wie Größe, Material, Verarbeitung und Alter abhängig. Es konnte ein Zusammenhang zwischen der Gesamtoberfläche und der Freisetzung von Quecksilber gefunden werden (Aronsson et al. 1989, Svare et al. 1981). Sie beträgt unstimuliert $0,08 \pm 0,1 \mu\text{g}$ Quecksilber je Minute und Quadratmillimeter Füllungsoberfläche. Im durchschnittlich mit Amalgam versorgten Gebiss führt dies zu einer Freisetzung von $3,3 \mu\text{g}/\text{min}$ bis $15 \mu\text{g}/\text{min}$ (Halbach 1995a, Lussi 1993, Schiele et al. 1999). Dabei können intraoral Quecksilberdampfkonzentrationen von $0,1$ bis $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen werden (WHO 1991, Svare 1984, Svare et al. 1981, Patterson et al. 1985, Bolt et al. 1990).

Die Abgabe von Quecksilber ist jedoch auch von der Beanspruchung der Amalgamfüllung abhängig. So steigt die Quecksilberfreisetzung durch mechanische Beanspruchung wie Kauen, Zähneputzen und Knirschen, sowie durch Spülen mit warmer Flüssigkeit signifikant an. Dieser Effekt konnte jedoch nicht für das Trinken heißer Flüssigkeiten nachgewiesen werden (Berglund 1990). Dabei steigt die intraorale Quecksilberdampfkonzentration kurzzeitig auf Werte um $0,08$ bis $188 \mu\text{g}/\text{m}^3$ an (Halbach 1995a, Svare et al. 1981, Ott et al. 1986). Dies entspricht einer Freisetzung von $16,3$ bis $163,2 \mu\text{g}$ Quecksilber je Minute (Halbach 1995a). Diese Werte wurden jedoch nicht bei allen Nahrungsaufnahmen erreicht, auch kehrten sie nach Beendigung der mechanischen Belastung innerhalb von ca. 90 Minuten wieder auf den Ruhewert zurück (Schiele 1998, Lorscheider et al. 1995, Patterson et al. 1985, Ott et al. 1986).

Die Entstehung von Dampf wird durch die Anwesenheit eines Speichelfilmes stark reduziert, der größte Teil des freigesetzten Quecksilbers wird durch Enzyme im Speichel oxidiert, und mit ihm geschluckt (Knappwost et al. 1985, Marek 1990, Olsson et al. 1989).

Das Alter der Amalgamfüllung ist ein wichtiger, die Quecksilberabgabe beeinflussender Faktor. Eine frisch gelegte Amalgamfüllung setzt $17,34 - 34,49 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ und Tag frei, eine zwei Jahre gealterte Amalgamfüllung entlässt jedoch nur $1,11$ bis $1,95 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ und Tag (Lussi und Schoenberg 1991). Andere Autoren fanden einen sehr starken Abfall der Quecksilberfreisetzung innerhalb der ersten Stunden oder Tagen nach der Trituration (Berglund 1993, Chien et al. 1996, Till und Wagner 1973a). Der Grund für diese Verringerung ist die Ausbildung einer

Passivierungsschicht auf der Oberfläche des Amalgams durch Oxidation der Legierungsbestandteile (Derand 1989, Ferracane et al. 1992), sowie die Verringerung des Quecksilbergehaltes im oberflächennahen Bereich der Füllung. Durch Reiben auf der Amalgamfüllung zum Beispiel durch Kaubewegungen kann die Passivierungsschicht jedoch in der Bildung gestört oder entfernt werden, was zu einer Erhöhung der Freisetzungsrates führen kann (Till und Wagner 1973b).

Eine weitere Reduktion erfolgt durch die professionelle Oberflächenbearbeitung. Bei der Politur einer Amalgamfüllung kommt es zur Verringerung der Oberfläche des Amalgams sowie zur Abnahme der γ_1 - und der γ_2 -Phase an der Oberfläche, was zu einer um bis zu 40% verringerten Quecksilberfreisetzung führt (Lussi und Schoenberg 1991, Stachniss 1989, Weiland et al. 1988a).

Amalgamfüllungen mit Kontakt zu metallischen Restaurationen anderer Legierungen geben vorübergehend erhöhte Mengen von Quecksilber ab. Dieser Effekt ist jedoch nach 2 bis 3 Minuten stark rückläufig (Knappwost et al. 1985, Jørgensen 1977, Lukas 1992). Amalgamfüllungen sollten daher keinen approximalen Kontakt zu anderen Metallen haben. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Belastungen bei Personen mit Amalgamfüllungen in Kontakt zu anderen Metallen und Personen ohne solche Kontakte besteht jedoch nicht (Gebel und Dunkelberg 1996).

Die von Amalgamkritikern angegebene Quecksilberfreisetzung liegt weit über diesen Werten. So gibt Dauderer eine Freisetzung von $100 \mu\text{g Hg}/\text{cm}^2$ je Mahlzeit und $300 \mu\text{g Hg}/\text{cm}^2$ pro Tag an (Dauderer 1992). Grund dafür sollen Quecksilbertröpfchen sein, die während der Politur ausgeschwitzt werden. Diese Freisetzungsraten werden jedoch nur erreicht, wenn die Füllung durch unsachgemäße Behandlung auf über 65°C erhitzt wird, was während der Nahrungsaufnahme jedoch ausgeschlossen ist.

2.3.4 Aufnahme und Verteilung im Organismus

Das aus den Amalgamfüllungen freigesetzte Quecksilber gelangt zum größten Teil mit dem Speichel in den Gastrointestinaltrakt, zum anderen Teil wird es während der Mundatmung inhaliert bzw. exhaliert. Abhängig von der Form, in der das aufgenommene Quecksilber vorliegt, wird es von den verschiedenen Epithelien unterschiedlich stark resorbiert.

Die höchste Resorptionsquote besitzt Quecksilberdampf Hg^0 in der Lunge. Es wird dort zu ca. 80% resorbiert und besitzt daher die höchste toxikologische Relevanz. Oral aufgenommenes elementares Quecksilber wird im Gastrointestinaltrakt nicht resorbiert, Grund dafür ist die schlechte Wasserlöslichkeit von Quecksilber (Halbach 1995a). Ionisiertes Quecksilber Hg^{++} wird

zu ca. 10% aufgenommen, im Kindesalter kann dieser Wert höher liegen (WHO 1991). Verschluckte, Quecksilber enthaltende Partikel werden im Darm nicht angegriffen (Wirz 1991). Dies führt zu einer Gesamtaufnahme des aus Amalgamfüllungen frei werdenden Gesamtquecksilbers von 1% (Wirz 1991). Methylquecksilber aus der Nahrung wird hingegen zu 95% im Gastrointestinaltrakt resorbiert (WHO 1991, Clarkson 1997, Engqvist et al. 1998).

Weitere Aufnahmewege gehen über die Mundschleimhaut (Willershausen-Zönnchen et al. 1992, Hahn et al. 1989) und über die äußere Haut, auf gesunder Haut ist die Resorption jedoch unbedeutend. Der retrograde axonale Transport über die Nervi olfactorius und trigeminus wird diskutiert, geringe Hg-Konzentrationen im Ganglion gasserie sprechen jedoch gegen diesen Transportmechanismus. Hohe Quecksilberbelastungen konnten in Pulpen amalgamgefüllter Zähne ermittelt werden (Schiele et al. 1987), bei Vorhandensein einer Unterfüllung ist eine Mehrbelastung jedoch nicht feststellbar (Babendererde et al. 1970).

Bei einer täglichen Freisetzung von 15 µg bis 120 µg pro okklusale Fläche aus Amalgamfüllungen resultiert eine innere Belastung von 2-5 µg Quecksilber pro Tag (Halbach 1995a, Berglund 1990, Mackert 1987), das 90% Perzentil liegt bei 27 µg pro Tag (Patterson et al. 1985, Lorscheider et al. 1995). Da die Quecksilberfreisetzung von der Beanspruchung der Füllungen abhängig ist, können bei Personen mit Bruxismus und chronischem Kaugummikonsum erhöhte Quecksilberbelastungen auftreten (Weiner und Nylander 1995, Svare 1984, Barregard et al. 1995). Die Aufnahme dieser Mengen Quecksilber führt zu einer durchschnittlichen Konzentration von 0,5–0,7 µg/l Quecksilber im Blut (Schweinsberg 2002, Gebhardt et al. 1995). Einige Autoren finden nach Legen und Entfernen von Füllungen leicht erhöhte Blut-Quecksilberwerte (Wirz 1991, Ott et al. 1986, Schneider et al. 1977), andere finden keinen Zusammenhang zwischen den Werten und einer stattgehabten Füllungstherapie (Wirz 1991, Berglund 1993). Schiele fand eine Abhängigkeit der Quecksilberkonzentrationen der Organe und der Anzahl der Amalgamfüllungen, Amalgamfüllungen tragen signifikant zur Belastung des menschlichen Körpers bei (Schiele 1992).

Für die Gesamtbevölkerung resultiert daraus eine Quecksilberkonzentration von 0,5–0,6 µg/l Blut, wobei 98% aller Personen Werte unter 6 µg/l Blut aufweisen (Halbach et al. 1997).

Für Kleinstkinder und Föten besteht eine indirekte Belastung durch die Amalgamfüllungen der Mutter. Elementares Quecksilber ist in der Lage, die Mutter-Kind-Barriere der Plazenta zu überwinden, die Belastung des Fötus ist vergleichbar mit der der Mutter (Vimy et al. 1997, Drasch et al. 1994, Schiele et al. 1999). Des Weiteren enthält die Milch von Amalgamträgerinnen signifikante Mengen von Quecksilber. Die Konzentration liegt mit $1,9 \pm 1,58$ µg/l jedoch weit unter der von Kuhmilch (Klemann et al. 1990). Aus diesen Quellen wird vom kindlichen Gastrointestinaltrakt bis zu 50% des Quecksilbers aufgenommen (Ekstrand et al. 1998). Aus diesem Grund

wurde die Empfehlung ausgesprochen, schwangeren Frauen keine neuen Amalgamfüllungen zu legen. Stoz fand jedoch keine Erhöhung der Belastung der Föten mit Quecksilber durch eine Füllungstherapie während der Schwangerschaft (Stoz et al. 1995).

In der Lunge aufgenommenes elementares Quecksilber ist hoch mobil und auf Grund seiner Lipophilie in der Lage, Zellgrenzen zu überschreiten und frei in Gewebe und Blut zu diffundieren. Es kann die Blut-Hirn-Schranke überwinden und in der Plazenta zum Blut des Fötus diffundieren, wo es zu ionisiertem Quecksilber oxidiert und angereichert wird. Auf Grund der Lipophilie ist das Zielorgan von elementarem Quecksilber das Gehirn. Die Verteilung im Körper hängt vom jeweiligen Anteil vom Herz-Zeit-Volumen ab. Es wird in den roten Blutkörperchen sowie zu einem geringeren Anteil im Gewebe durch den Katalase-Hydrogen-Peroxid-Pfad zu ionisiertem zweiwertigen Quecksilber oxidiert (Clarkson 1997). Ionisiertes Quecksilber ist nicht in der Lage, frei durch Zellmembranen zu diffundieren, kann jedoch Chlorid-Kanäle nutzen (Clarkson 1997).

Ionisiertes Quecksilber besitzt eine hohe Affinität zu Sulfid-Gruppen von Proteinen, sowie zu Metallothionein. 50%-90% des gesamten Quecksilbers ist an Metallothionein gebunden. Die Niere ist daher das Organ mit der höchsten Quecksilberkonzentration (Cox und Eley 1986, Schweinsberg 2002, Takahashi et al. 1986), sie enthält durchschnittlich 93,1 µg/kg Feuchtgewebe. Die Leber und das Gehirn sind die am stärksten belasteten Organe nach der Niere, sie enthalten 45 µg/kg bzw. 11 µg/kg Feuchtgewebe (Maas et al. 1996, Bolt et al. 1990, Drasch et al. 1992). Weitere quecksilberspeichernde Organe sind Schilddrüse, Hypophyse, Pankreas, Hoden, Ovar und Prostata (Schiele 1998), es besteht ein Zusammenhang zwischen der Organ-Quecksilber-Konzentration und der Anzahl der Amalgamfüllungen (Schiele 1996, Babendererde et al. 1970, Drasch et al. 1997). Extreme Quecksilberkonzentrationen können in den Pulpen von Zähnen mit Amalgamfüllungen gemessen werden (Schiele 1996), wird eine Unterfüllung gelegt, ist jedoch kein Quecksilber in den Pulpen nachweisbar (Mayer et al. 1995).

Ionisiertes Quecksilber ist nur zu einem sehr geringen Teil in der Lage, die Plazentaschranke zu überwinden, elementares Quecksilber kann dies jedoch ohne Probleme. Es wird im Gewebe des Föten oxidiert und somit akkumuliert. Anders als post partem wird das Quecksilber im ungeborenen Kind in der Leber gespeichert. Dies wird als Schutzfunktion angesehen, nach der Geburt findet eine Umverteilung zur Niere statt. Bei Untersuchungen des Fruchtwassers konnten sehr geringe Quecksilberwerte, jedoch kein Zusammenhang zwischen diesen und der Anzahl der Amalgamfüllungen der Mutter festgestellt werden (Klemann et al. 1990).

Die Halbwertszeiten von Quecksilber im menschlichen Körper sind vom Kompartiment und von der Form des Quecksilbers abhängig. Sie beträgt im Blut 2-30, in der Lunge 2-20, in der Niere 53-64 Tage und im Gehirn Tage bis mehrere Jahrzehnte. Die sehr hohe Halbwertszeit von

18 Jahren im Gehirn (Wassermann 1997) ist jedoch extrem und nicht korrekt belegt (Halbach et al. 1997). Die Halbwertszeit für das Quecksilber des gesamten Körpers beträgt circa 60 Tage (WHO 1991, Schweinsberg 2002).

Es existieren mehrere Ausscheidungswege für Quecksilber. Die größte Menge Quecksilber wird über die Leber, d.h., über den Stuhl ausgeschieden. Der zweite wichtige Weg führt über die Niere, das Verhältnis Stuhl : Urin beträgt zwischen 1:1 und 3:1 (Skare und Engqvist 1994, Weiner und Nylander 1995), bei chronischer Belastung dominiert jedoch die Ausscheidung über den Urin (Ekstrand et al. 1998). Die Konzentration im Urin beträgt 0,8 bis 6,9 µg/g Kreatinin, der Referenzwert liegt in Deutschland bei 4 µg/l Urin (Schiele 1998, Weiner und Nylander 1995). Es existiert ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der Amalgamfüllungen und der Quecksilberkonzentration im Urin (Aronsson et al. 1989), Kaugummikauer und Personen mit Bruxismus können höhere Werte bis zu 25 µg /g Kreatinin erreichen (Ekstrand et al. 1998).

Die Belastung des zahnärztlichen Personals liegt in hygienischen Praxen im Bereich der der Normalbevölkerung. Für eine geringe Belastung der Praxismitarbeiter durch das bei der Füllungslegung frei werdende Quecksilber ist die gute Lüftung und die Aufbewahrung überschüssigen Amalgams in luftdicht verschließbaren Behältern notwendig (Eggleston 1989).

2.3.5 Toxikologie beim Menschen

Die schädigende Wirkung von Quecksilber kann zwei unterschiedliche Formen annehmen: die toxikologische Schädigung und die allergische Reaktion. Zur Zeit sind bei einigen Krankheitsbildern beide Mechanismen nicht klar zu trennen.

Die toxikologische Wirkung von Quecksilber ist seit vielen Jahrhunderten bekannt. Bereits die Römer wussten um die schädigende Wirkung, Sklaven in Quecksilberminen hatten oft eine Lebenserwartung von wenigen Wochen. Später wurden quecksilberhaltige Salben als Therapiemittel gegen Syphilis verwendet, schwere Vergiftungserscheinungen bis hin zu Todesfällen waren nicht selten (Goering et al. 1992, Clarkson 1997).

1881 sowie 1965 führte das Freiwerden von hohen Mengen Quecksilber aus der ortsansässigen Acetaldehydproduktion in die Bucht von Minamata und Niigata zu Anreicherung der Fischnahrung mit Methylquecksilber, Vergiftungen mit schweren Missbildungen der Neugeborenen der Fischerfamilien waren die Folge. 1971/72 kam es im Irak zu mehr als 600 Todesfällen, nachdem mit quecksilberhaltigen Fungiziden behandeltes Saatgut zur Produktion von Brot verwendet wurde. Aus diesen Vorfällen, aus Fällen der beruflichen Quecksilberintoxikation sowie aus Unfällen mit Quecksilber konnten fundierte Erkenntnisse über die Toxizität von Quecksilber und seinen Verbindungen gewonnen werden.

Die schädigende Wirkung des Quecksilbers beruht auf seiner Fähigkeit, an Proteine, dort hauptsächlich an SH-Gruppen, zu binden und so deren Tertiärstruktur zu stören. So werden vor allem die magnesiumabhängige ATPase, die Fructosediphosphataldolase und die Succinyldehydrogenase in ihrer Funktion eingeschränkt (Schiele 1998, WHO 1991). Intrazellulär findet sich Quecksilber meist membranassoziiert, d.h., an Mitochondrien, Zellwänden, am endoplasmatischen Retikulum sowie am Zellkern. Hier kann es zur Inhibition von Proteinen, aber auch der RNA-Synthese und der Mitose kommen. Quecksilber ist jedoch nicht karzinogen (WHO 1991, Städtler 1991).

Des Weiteren besitzt Quecksilber die Fähigkeit, bestimmte Cl^- -Kanäle zu nutzen und zu aktivieren. Es kann so auch zu einer Freisetzung von Acetylcholin aus Nervenendigungen führen (Clarkson 1997).

Bei einer kurzzeitigen Aufnahme toxischer Mengen von Quecksilber sind die an der Aufnahme beteiligten Organe akut betroffen. Im Falle einer Inhalation großer Mengen Quecksilberdampfes kommt es zu Thoraxschmerzen, Dyspnoe, Husten, Haemoptyse, Fieber, bis hin zur Pneumonitis und Tod. Nach Ingestion großer Mengen von Quecksilbersalzen kommt es zur Gastritis, Nausea, Erbrechen, Metallgeschmack, Diarrhoe, später zu Proteurie, zum nephrotischen Syndrom mit Tubulusnekrose und Anurie (WHO 1991, Schiele 1998). Die letale Dosis liegt bei 3 - 15 μg ionisiertes Quecksilber je Kilogramm Körpergewicht (Schweinsberg 2002), das Verschlucken von elementaren Quecksilber ist dagegen wenig gefährlich (Wirz 1991).

Bei chronischer Belastung mit hohen Mengen Quecksilber kommt es vor allem zur Beeinträchtigung der Zielorgane Niere und Hirn. Es kommt zur Stomatitis mit Bleisaum der Gingiva, Metallgeschmack, Proteurie. Neurologische Zeichen einer chronischen Intoxikation sind Kopfschmerz, Schwindelgefühl, Tremor der Hände, Sprachstörungen, Reizbarkeit, extreme Scheue, Labilität, Vergesslichkeit, Depressionen mit suizidaler Tendenz, klonischen Krämpfen und Lähmungen (Eggleston 1989, Goering et al. 1992, Patterson et al. 1985, Piikivi und Tolonen 1989).

Diese Symptome sind Zeichen einer Vergiftung mit Quecksilber, sie treten erst bei Belastungswerten auf, die von Amalgamfüllungen nicht erreicht werden (Schweinsberg et al. 1998). Subklinische, mit EEG messbare psychomotorische Änderungen treten bei einem Blutquecksilberwert von 10 bis 20 $\mu\text{g/l}$ bzw. bei Urinwerten über 50 $\mu\text{g/l}$ auf, ein Handtremor ab 25 $\mu\text{g/l}$ (WHO 1991, Svare 1984, Gebhardt et al. 1995). Schweinsberg fand jedoch auch bei beruflich exponierten Personen mit Quecksilberkonzentrationen oberhalb des BAT-Wertes von 25 μg Quecksilber je Liter Blut keine Symptome (Schweinsberg 1994). Auch Tulinius fand keinen Zusammenhang zwischen der stark erhöhten Quecksilberbelastung von Schulkindern durch fischreiche Nahrung und deren schulischen Fähigkeiten (Tulinius 1995). Als Form einer

chronischen Belastung mit geringen Mengen Quecksilber wird der Mikromerkuralismus diskutiert. Die Symptome sind subjektiv. Müdigkeit, Konzentrationsschwäche, Gedächtnisstörung, Reizbarkeit, Schlaflosigkeit und Schwäche wurden beschrieben. Sie traten erst ab Urinwerten von über 25 µg Quecksilber je Gramm Kreatinin auf (Schweinsberg 2002). Andere Autoren halten das Krankheitsbild für „bestenfalls fragwürdig“ (Halbach et al. 1997, Staehle 1992), es zeigten sich in den Publikationen mehrere Widersprüche. Die WHO schloss sich 1976 der Kritik an (Halbach et al. 1997).

Bei einer chronischen Belastung durch Quecksilber gilt die Niere als Zielorgan, die Konzentration von Quecksilberionen ist hier am höchsten. Diese Konzentrierung ist durch die hohe Affinität des Quecksilbers zu Metallothionein, welches in der Niere in hohen Konzentrationen vorliegt, begründet. Eine Alterierung der Nierenfunktion kann bei Werten ab 20 µg/g Kreatinin auftreten, welche von den meisten Amalgamträgern nicht erreicht werden (Schweinsberg et al. 1998). Es kann oberhalb dieser Werte eine erhöhte NAG-Aktivität (N-Acetyl-γ-D-Glucosamidase) im Urin auftreten. Diese ist jedoch noch kein Zeichen einer Schädigung der Niere (Ekstrand et al. 1998). Eine Abhängigkeit der Ausbildung von Symptomen von individuellen Faktoren, wie z. B. die MHC-Komplexe, ist möglich, die Bedenklichkeit von Amalgam als Füllungsmaterial daher nicht generell auszuschließen (Lübbe und Wüthrich 1997). Bei hohen Quecksilberwerten kann es zur Ablagerung von Antikörpern gegen die Basalmembranen der Glomeruli sowie zur Anreicherung von Quecksilber in den Tubuli und dadurch zur Glomerulopathie und zur Tubulusnekrose kommen (WHO 1991, Schweinsberg 2002). Boyd et al. fanden eine Senkung der glomerulären Filtrationsrate bei Schafen mit 12 Amalgamfüllungen, jedoch keine histologischen Veränderungen (Boyd et al. 1991). Sandburg-Englund et al. konnten dies nicht bestätigen (Sandburg-Englund et al. 1996). Es folgen Proteurie und das nephrotische Syndrom. Die Belastung durch Quecksilber aus Amalgamfüllungen führt jedoch nur in Extremfällen zu geringen Effekten auf die Niere, eine Nierenschädigung durch Amalgam erfolgt nicht (Aronsson et al. 1989, Eti et al. 1995).

In Minamata und Niigata waren vor allem Neugeborene betroffen, schwere Missbildungen traten auf. Bei einer Untersuchung der Geburtenrate von Zahnärzthelferinnen in Polen zeigte eine signifikant höhere Abort- und Todgeburtsrate, fünf von sechs Missbildungen waren Fälle von Spina bifida (Schuurs 1999, Molin 1992). Bei beruflich belasteten Frauen kommt es zu Unregelmäßigkeiten im Menstruationszyklus (Schuurs 1999, WHO 1991). In Tierversuchen kam es zu schweren toxischen Wirkungen auf die Nachkommen, diese wurden jedoch nur bei extremen Dosen von Quecksilber beobachtet, unter 100 µg/m³ kam es nicht zu Störungen. Untersuchungen bei zahnärztlichen Personal in Deutschland, Schweden und der Schweiz zeigten jedoch keine höhere Inzidenz von Missbildungen und Aborten, die Quecksilberbelastung lag in

den Praxen durch gute Hygiene und Belüftung unterhalb schädlicher Konzentrationen. Untersuchungen an Schwangeren und deren Neugeborenen zeigten keinen Zusammenhang zwischen der Gesundheit, der Größe und späteren Entwicklung der Kinder und der Anzahl der Amalgamfüllungen der Mutter (Schiele et al. 1999). Der Zusammenhang zwischen Amalgamfüllungen und der Ausbildung einer Spina bifida ist widerlegt (Halbach et al. 1997). Fundierte Berichte über eine erhöhte Sensibilität von Neugeborenen gegenüber Quecksilber existieren nicht (Drasch et al. 1994, Wirz 1991). Schäden treten bei Neugeborenen erst bei einer im Vergleich zur letalen Dosis relativ hohen Belastung auf (WHO 1991). Die Empfehlung, während der Schwangerschaft auf eine Versorgung mit Amalgam zu verzichten, ist derzeit nicht toxikologisch begründet (Wirz 1991).

In Tierversuchen wurden unterschiedliche Effekte auf das Immunsystem beschrieben. So fand man bei einigen Arten eine Induktion von Autoimmunität, andere Arten zeigen im Gegensatz dazu jedoch eine Repression des Immunsystems (Eneström und Hultman 1995). Für den Menschen ist bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt außer der Amalgamallergie kein Effekt auf das Immunsystem ausreichend beschrieben. Effekte auf Leukozyten konnten nicht nachgewiesen werden (Wilhelm et al. 1991). Es wird jedoch die Resistenzbildung gegen Antibiotika bei Oral- und Gastrointestinalflora beschrieben. Auf Grund der Lage des Genes für die Quecksilberresistenz in der Nähe der Resistenzgene gegen andere Antibiotika auf dem Plasmid des Bakteriums wird diskutiert, dass eine Transkription dieser Gene bei Quecksilberbelastung stattfindet, und so eine Resistenz auch gegen antibiotisch wirksame Substanzen erzeugt wird, ohne dass diese vorher verabreicht wurden. Summers et al. fanden eine höhere Inzidenz für quecksilberresistente Bakterien, auf antibiotikahaltigen Nährböden zu wachsen, als für nicht quecksilberresistente (Summers et al. 1993). Andere Autoren fanden jedoch keine Resistenzbildungen der Gastrointestinal- und Oralflora (Ekstrand et al. 1998, Schweinsberg et al. 1998). Der Selektionsdruck durch Quecksilber aus Amalgam ist anscheinend nicht ausreichend (Hanke 2002)

Seit Beginn des ersten „Amalgamkrieges“ wird die ständige Freisetzung von Quecksilber aus Amalgamfüllungen als Ursache für eine Vielzahl von Krankheiten angesehen. Das chronic-fatigue-syndrome (chronische Müdigkeitssyndrom), das multiple-chemical-sensitivities-syndrome (Multiple Überempfindlichkeit), Arthritis, Multiple Sklerose, Morbus Alzheimer, Morbus Parkinson, Autoimmunität bis hin zur Infertilität sollen durch Amalgam ausgelöst werden (Daunerer 1999, Ely et al. 1999, Swartzendruber 1993, Larose 2001). Lokale Ströme sollen die Gingiva reizen und Störungen des Nervensystems verursachen (Raue 1992, Kramer 1992), sowie der hauptsächliche Faktor bei der Entstehung einer Gingivitis und Periodontitis sein, sogar die Entstehung der Karies wird dem Material angelastet (Swartzendruber 1993,

Knappwost et al. 1985, Daunderer 1999). Untersuchungen zeigen jedoch bis heute keinen Zusammenhang zwischen diesen Krankheiten und Amalgamfüllungen (Eneström und Hultman 1995, Fischer 1997). Für einen Stromfluss ist der Elektrolytgehalt des Speichels nicht ausreichend (Gebhardt et al. 1995), der gemessene Stromfluss von 6 μ A (Kramer 1992) liegt unterhalb physiologischer Ströme, Fernwirkungen solch geringer Ströme sind „Unsinn“ (Marxkors 1992). Quecksilberkonzentrationen von Personen mit meist selbst diagnostiziertem oralen Galvanismus unterscheiden sich nicht von denen gesunder Patienten, eine Dosis-Wirkungs-Beziehung ist nicht erkennbar. Ein Zusammenhang zwischen der Anzahl von Beschwerden und der Anzahl von Amalgamfüllungen besteht nicht (WHO 1991, Molin 1992, Ahlqwist et al. 1988), eine Quantifizierung und Belegung von Nebenwirkungen ist nicht möglich (Knolle 1992). Oft findet sich ein psychologischer Hintergrund bei Patienten mit amalgamassozierten Symptomen. Ein zeitlicher Zusammenhang des Auftretens der Beschwerden mit bibliographischen Daten ist oft vorhanden (Schiele 1996, Molin 1992, Staehle 1992, Müller-Fahlbusch 1992). Die Entfernung von Amalgamfüllungen hat nicht zur erwarteten Besserung geführt (Müller-Fahlbusch 1992).

Die einzige anerkannte Nebenwirkung des Medikamentes Amalgam ist die Amalgam-Allergie (Knolle 1992).

2.3.6 Amalgamallergie

Die Allergie in Form der Sofortreaktion auf Quecksilber ist sehr selten beschrieben. Jedoch auch für die verzögerte Typ-IV-Reaktion nach Greene sind in der gesamten Literatur bisher nur ca. 100 Fälle beschrieben worden (Eneström und Hultman 1995, 8, Molin 1992). Typisches Symptom einer durch Hypersensibilität auf Quecksilber bedingten Reaktion ist ein Exanthem perioral sowie an Nacken und Gliedmaßen. Es tritt unmittelbar nach der Versorgung mit Amalgam auf, jedoch nach 5 bis 10 Tagen wieder abklingt (Swartzendruber 1993, WHO 1991). Zusätzlich sind orale Symptome wie entzündliche Erosionen, rezidivierende Aphthen, der orale Lichen planus und Leukoplakien möglich (Lübbe und Wüthrich 1997, Gebhardt et al. 1995). Die Entstehung oraler lichenoider Läsionen ist jedoch nicht vollständig geklärt, diskutiert wird die Kombination aus allergischer, mechanischer und toxischer Genese, die Unterscheidung zwischen allergischer und toxischer Wirkung ist schwierig (Eneström und Hultman 1995, Swartzendruber 1993). Symptome wie Kopfschmerz, Müdigkeit und Infektanfälligkeit sind keine Zeichen einer Allergie (Gebhardt et al. 1995).

Voraussetzungen für die Diagnose einer Amalgamallergie ist das simultan mit der Versorgung auftretende objektivierbare Krankheitsbild mit Abklingen nach Amalgamentfernung, zusammen

mit dem Epikutantest (Schweinsberg 2002). Der Epikutantest allein ist jedoch nicht ausreichend für die Feststellung einer Allergie auf Amalgam (Sellars et al. 1986).

Eine Sensibilisierung des Organismus auf Quecksilber durch Amalgamfüllungen ist nicht möglich, da in der Mundschleimhaut nur sehr wenige Langerhanssche Zellen und damit wenig Haptene existieren. Für eine Sensibilisierung wäre eine 5- bis 12-fache Quecksilberkonzentration notwendig (Lübbe und Wüthrich 1997, Gebhardt et al. 1995). Die Sensibilisierung der Bevölkerung auf Quecksilber ist jedoch durch den Kontakt mit Sublimat in Frostschutzmitteln, Saatweizen, Insektiziden, Katalysatoren, Imprägnierungsmitteln und vielen mehr möglich (Klaschka und Matzick 1992).

Bei bestehen einer Amalgamallergie ist das Entfernen der Amalgamfüllungen indiziert, in der Regel jedoch nicht notwendig (Herrmann 1997). Es muss unter Schutzmaßnahmen wie Kofferdam und hochvolumigem Absaugen geschehen, um die Quecksilberaufnahme während des Ausbohrens zu vermeiden (Schweinsberg 2002).

3 Zielstellung

Ziel dieser Arbeit war es, die Quecksilberdampffreisetzung aus Amalgamprüfkörpern von 50 mm² durch Putzabrasion in-vitro unter variierenden Versuchsbedingungen zu bestimmen.

Dazu wurden die amalgamgestopften Prüfkörper in einer für diesen Versuch nach eigenen Vorstellungen gefertigten Prüfmaschine folgenden Bedingungen ausgesetzt:

1. Variation des Amalgames unter Verwendung eines konventionellen Amalgams sowie von drei anderen modernen Gamma-zwei-freien Amalgamen.
2. Variation der Verarbeitungsqualität während des Stopfvorganges durch Änderung des Stopfdruckes sowie des Instrumentariums.
3. Variation der Verarbeitungsqualität durch die Nachbearbeitung unter Verwendung polierter und unpolierter Prüfkörper.
4. Variation des Untersuchungszeitpunktes relativ zum Stopfzeitpunkt mit Messungen nach 24 und 72 Stunden sowie nach 7 und 14 Tagen.
5. Messung der nach Ende der Putzbewegungen über der trockenen Amalgamfüllung frei werdenden Quecksilberdämpfe.

Darüber hinaus sollte neben der Quecksilberdampfmesung die jeweilige Quecksilberfreisetzung in die Abrasionsflüssigkeit bestimmt werden.

Die so gewonnenen Daten sollten mit Hilfe eines mathematischen Modells auf in-vivo-Verhältnisse übertragen und die Belastung von Amalgamfüllungsträgern vor dem Hintergrund der möglichen Einflüsse eingeschätzt werden und so zu einer toxikologischen Bewertung führen.

4 Material und Methode

4.1 Verwendete Amalgame

In diesem Versuch kamen vier verschiedene Amalgame zum Einsatz: das Amalcap Plus® der Firma Vivadent, das Contour® der Firma Kerr sowie das Duragam® und das Dentargam® des VEB Bergbau- und Hüttenkombinat „Albert Funk“ Freiberg.

Das verwendete Amalcap Plus® der Firma Vivadent repräsentiert ein modernes hochkupferhaltiges Amalgam. Es besitzt sehr gute physikalische Eigenschaften wie eine geringe Dimensionsänderung beim Abbinden, eine hohe Druckfestigkeit und einen geringen Creep relativ unabhängig von der Triturationszeit (Wirz et al. 1978). „Amalcap Plus®“ entsteht aus einer Legierung, dessen Pulver 70% Silber, 18% Zinn, 11% Kupfer und kein Zink enthält. Während des Abbindens mit Quecksilber entstehen die Phasen γ_1 sowie η , die Bildung der Gamma-2-Phase unterbleibt. Durch die stöchiometrisch zu geringe Quecksilberzugabe bei der Trituration (50,3% statt 62,5%) resultiert eine trockene, leicht plastische Masse, die nach dem Aushärten noch unverbrauchte Gammaphase und AgCu-Eutektikum enthält (Mahler et al. 1975). Das Pulver wird durch Verdüsen hergestellt, und voramalgamiert. „Amalcap Plus®“ ist daher ein Kugelamalgam, das auch bei trockener Anmischung und geringeren Kondensationsdrücken optimal an der Kavitätenwand adaptiert (Schmalz und Thonemann 1999, Gainsford 1983). Für diesen Versuch wurde „Amalcap Plus®“ aus herstellerseitig vordosierten Einmalkapseln der Größe 3 verwendet. Das Vordosieren garantiert ein optimales Mischungsverhältnis bei allen hergestellten Füllungen, die kleinen Kapseln verhindern ein Entmischen der unterschiedlichen Kugelgrößen (Jørgensen 1977).

Contour® der Kerr Corporation ist ein weiteres modernes normalhärtendes Gamma-2-freies Amalgam. Das Pulver enthält 41% Silber, 31% Zinn sowie 28% Kupfer. 70% des Pulvers wird durch Verdüsen, 30% durch Zerspanung hergestellt. Es zeigt damit eine gute Adaptation an die Kavitätenwände bei leicht erhöhtem Kondensationsdruck. Eine bereits vordosierte Kapsel enthält 600 mg Pulver sowie 532 mg (47%) Quecksilber, auch hier entsteht ein trockenes, leicht plastisches Amalgam mit leichtem stöchiometrischen Quecksilbermangel.

Das Amalgam Duragam® ist eine hochkupferhaltige Gamma-2-freie Legierung. Sie besteht aus Silber, Zinn und Kupfer, und wurde durch Verdüsen hergestellt. Es wurde in nicht vordosierter Form in einer Kunststoffflasche zu 200 g vertrieben. Um eine Entmischung der Partikelgrößen zu kompensieren, wurde die Flasche vor Gebrauch geschüttelt. Die Legierung und hochreines

Quecksilber wurde in gereinigte Kapseln eingewogen. Die Herstellerangaben das Mischungsverhältnis betreffend, wurden dabei eingehalten. Es wurden 0,90 g Pulver und 0,90 g Quecksilber mit einer Genauigkeit von 0,005 g eingewogen. Das Quecksilber wurde direkt vor der Trituration im „Espe Cap Mix“ zum Pulver gegeben.

Das Amalgam Dentargam® ist ein konventionelles Amalgam. Beim Abbinden verbleibt eine Gamma-2-Phase. Die Lieferung erfolgte in einer Plastikflasche mit 100 g Pulver. Die Partikel wurden sehr grob gefeilt, Partikel mit bis zu einem Millimeter Größe lagen vor. Ebenso wie das Duragam® wurde es mit einer Genauigkeit von 0,005 g in gereinigte Kapseln eingewogen und unmittelbar vor der Trituration mit Quecksilber im Mischungsverhältnis 3 : 4 Gewichtsteile Quecksilber : Pulver zusammengegeben und im „Espe Cap Mix“ trituriert.

4.2 Versuchsaufbau

4.2.1 Prüfkörper

4.2.1.1 Allgemeine Herstellungsrichtlinien

Zur Aufnahme der Amalgamfüllungen dienten gegossene zylinderförmige Körper aus Epoxidharz. Sie hatten einen Durchmesser von 12,4 mm und eine Höhe von 5 mm. Die Oberflächen wurden geglättet und poliert. Die Präparation der Kavität erfolgte mittels eines Bohrers mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Tiefe von 2,5 mm. Daraus ergab sich für die später eingebrachte Amalgamfüllung eine Oberfläche von 52,27 mm². Dies entspricht in etwa einer Amalgamfüllung mit drei Flächen im Oberkiefer-Prämolaren oder einer zweiflächigen Molarenfüllung (51,95 bis 52,96 mm²) (Mayer und Gantner 1989, Mayer et al. 1995).

Das Amalgam wurde unmittelbar nach der Trituration in die Kavitäten eingebracht. Dabei fanden folgende Regeln für die Herstellung einer optimalen Amalgamfüllung Beachtung:

1. Die Trituration des Amalgams fand in vordosierten Kapseln statt. Es wurde das Gerät „Espe Cap Mix“ verwendet. Mit einer Schwingungszahl von 4500 pro Minute, einer Spannvorrichtung passend für die Kapseln und einem verschlossenen Triturationsraum erfüllt es die Voraussetzungen zur optimalen Trituration (DIN EN 1991).

Alle Amalgame wurden den Herstellerangaben entsprechend zehn Sekunden trituriert. Das Ergebnis war in allen Fällen eine leicht plastische, trockene Masse, die nicht bröckelte.

2. Ein Auspressen von überschüssigem Quecksilber fand nicht statt, da für alle Amalgame das trockene Anmischverhältnis gewählt wurde (Helbig 1953). Da hauptsächlich Kugelamalgame verwendet wurden, ist die Entstehung von Poren und Adaptationsfehlern wenig ausgeprägt (Jørgensen 1977).
3. Das Stopfen der Amalgamfüllung wurde sofort nach der Trituration begonnen, um die Phase der höchsten Plastizität zu nutzen und ein Einbringen bereits kristallisierender Massen zu verhindern (Helbig 1953).
4. Es wurden immer kleine Portionen in die Kavität eingebracht, um eine optimale Kondensation auch der tieferen Schichten innerhalb der Lagen zu ermöglichen (Gainsford 1983).
5. Die Kondensation erfolgte manuell. In allen Fällen bis auf die Charge „Kugelstopfer“ wurde ein planer kreisförmiger Stopfer mit einem Durchmesser von 1,6 mm verwendet (Gainsford 1983). Jede einzeln eingebrachte Portion wurde überlappend handfest kondensiert, bis ein Verrutschen des kondensierten Amalgams nicht mehr erfolgte. Der Kondensationsdruck wurde für eine Sekunde aufrecht erhalten, um das Gleiten der Partikel gegeneinander in ausreichenden Maßen zu gewährleisten (Jørgensen 1977). Zur Kondensation einer Charge wurde ein Kugelstopfer mit dem Durchmesser von 1,8 mm verwendet. Der Vergleich mit einer eigens angefertigten Wippe (Bild 5.1) zeigte, dass bei der handfesten Kondensation Stopfdrücke von ca. 10 N/mm^2 erzeugt wurden. Auf eine maschinelle Kondensation wurde verzichtet, da kein wesentlicher Unterschied zwischen den Kondensationsmethoden besteht, jedoch während der maschinellen Kondensation mehr Quecksilberdampf freigesetzt wird, und ein porenreicheres Gefüge entstehen kann (Jørgensen 1977).
6. Die Kavität wurde immer mit einer Portion überstopft. Auch diese Portion wurde wie oben beschrieben kondensiert, um die Lage mit der höchsten Quecksilberkonzentration nach außerhalb der Füllung zu verlagern (Helbig 1953, Knappwost et al. 1985). Die überschüssige Menge Amalgam wurde danach mit einem langen geraden Füllspatel unter Abstützung auf dem Kunststoffrand der Kavität entfernt, so dass eine plane exakt mit dem Kunststoff abschließende Amalgamfläche entstand (Gainsford 1983).
7. Die Politur erfolgte bei allen Prüfkörpern nach einer Woche (Helbig 1953). Die Amalgamfläche wurde mit einem feinen kreuzverzahnten Fräser mit langem geraden Arbeitsende ohne Druck vorsichtig geglättet. Dem folgte die Vorpolitur mit einem Brownie®, einem Metallpoliergummi mit eingebetteten Polierkörpern. Bei Vorliegen einer gleichmäßig matt schimmernden Oberfläche wurden die Körper mit dem

Supergreenie[®], einem Hochglanz-Poliergummi bearbeitet, bis die Oberfläche ohne sichtbare Kratzer und Spuren glänzte.

Alle Schritte wurden niedrigtourig bei zirka 3000 Umdrehungen je Minute, unter stetiger Wasserkühlung und drucklos vorgenommen, um ein Überhitzen und damit eine Beschädigung der Kristallstruktur des Amalgams zu vermeiden (Weiland et al. 1988a).

8. Die Lagerung der Prüfkörper erfolgte bei Raumtemperatur. So konnte die bis 10 Tage nach Füllungslegung erhöhte initiale Quecksilberabgabe abgewartet werden. Nach der Politur wurden die Prüfkörper in einer feuchten Kammer aufbewahrt, um die für die Passivierung der Oberfläche notwendige Korrosion der Legierung zu ermöglichen.

4.2.1.2 Variationen bei der Herstellung

Die Versuchsreihe sollte zeigen, ob und in welcher Weise die Quecksilberfreisetzung aus Amalgam-Prüfkörpern unter standardisierten Versuchsbedingungen durch unterschiedliche Herstellungsweisen der Füllungen beeinflusst wird. Spezielles Augenmerk lag hier auf der Qualität der Prüfkörper sowie deren Alter.

Es wurden 12 verschiedene Chargen mit jeweils sechs Prüfkörpern hergestellt.

Um die Qualität der gelegten Amalgamfüllungen variieren zu können, wurden für die einzelnen Chargen Abweichungen von der obigen Stopfmethode vorgenommen:

- **Amalcap Plus[®], Contour[®], Duragam[®], Dentargam[®]**: Jeweils sechs Prüfkörper wurden mit den Amalgamen Amalcap Plus[®] der Firma Vivadent, Contour[®] der Firma Kerr, Dentargam[®] und Duragam[®] des Kombinat „Albert Funk“ gestopft. Alle Punkte des oben genannten Schemas wurden eingehalten.
- **„Planer Stopfer“**: Sechs Prüfkörper wurden ohne Abweichungen zum oben genannten Schema aus "Amalcap Plus[®]" hergestellt, um Normalwerte zu erhalten. Die Füllungen entsprechen weitestgehend lege artis hergestellten Füllungen.
- **„Kugelstopfer“**: An Stelle eines planen Stopfers wurde ein Kugelstopfer mit einem Durchmesser von 1,8 mm und "Amalcap Plus[®]" verwendet. Dabei kommt es im Bereich bereits kondensierter Flächen durch den schrägen Kraftverlauf an der Kugeloberfläche wieder zu schwachen Dekondensationen. Mit Hilfe dieser Prüfkörper soll überprüft werden, ob dies eine Auswirkung auf die Quecksilberfreisetzung hat.
- **„20 N/mm²“**: Schmalz et al. empfiehlt sehr hohe Stopfdrücke bis zu 20 N/mm², um eine gute Amalgamfüllung zu erhalten (Schmalz et al. 1999). Zur Erzielung und Überprüfung eines genauen Stopfdruckes wurde eine Wippe angefertigt. (Bild 1) Sie wurde mit 2330 g beschwert und die Hebelarme derart bemessen, das unter dem

Instrument ein Druck von $20 (\pm 2) \text{ N/mm}^2$ notwendig war, um das Gewicht leicht anzuheben. Die Prüfkörper wurden auf dieser Wippe mit "Amalcap Plus®" gestopft, das Verkippen des Stopfers wurde vermieden.

- „**2N/mm²**“ : Nach Schmalz et al. kommt es in praxi jedoch nicht zur ausreichenden Kraftentwicklung während des Stopfens (Schmalz et al. 1999). Die aufgebrachte Kraft je Fläche liegt demzufolge bei $1 - 2 \text{ N/mm}^2$. Um den Einfluss dieses um den Faktor zehn geringeren Druckes auf die Quecksilberabgabe ermitteln zu können, wurde die Wippe mit 770 g beschwert und die Hebelverhältnisse so gewählt, dass ein Stopfdruck von $2 (\pm 0,2) \text{ N/mm}^2$ zustande kam. Auch hier wurde das Amalgam „Amalcap Plus®“ verwendet.



Abb. 1: Wippe zur Erzeugung eines genauen Stopfdruckes. Auf dem linken Hebelarm finden sich die Gewichte, auf dem rechten der zu stopfende Prüfkörper. Bei Erzeugung einer Kraft von 34 N unter dem Stopfer hebt sich der Lastarm an. Dies entspricht einem Druck von 20 N/mm^2 .

- „**Unpoliert**“: Unpolierte Amalgamfüllungen sollen höhere Quecksilbermengen abgeben, als solche, die lege artis poliert wurden. Um den Einfluss der Politur unter den Bedingungen des Zähneputzens ermitteln zu können, wurden Prüfkörper nach dem oben genannten Schema aus "Amalcap Plus®" hergestellt, jedoch nicht poliert.
- „**Poliert**“ : Um einen Vergleich mit der Charge „Planer Stopfer“ vornehmen zu können, wurden die Prüfkörper der Charge „Unpoliert“ nach der Messung auf Hochglanz poliert und nach zweitägiger Aufbewahrung im feuchten Milieu erneut vermessen.

- „**Alter**“ : Sechs Prüfkörper aus "Amalcap Plus®" wurden nicht erst nach Ablauf einer Woche, sondern bereits nach 24 Stunden poliert und der Messung zugeführt. Nach Ablauf von insgesamt 72 Stunden, 8 Tagen und 14 Tagen wurden die Prüfkörper erneut geprüft, um den Alterungsprozess beobachten zu können.

Die so entstandenen Prüfkörper wurden in fünf Gruppen eingeteilt (siehe Tab. 3), um Vergleiche innerhalb der Gruppe zu ermöglichen, und damit den Einfluss einzelner Variationen auf die Quecksilberfreisetzung quantifizieren zu können:

1. Gruppe: Um den Einfluss des verwendeten Materials (Gamma-2- sowie Non-Gamma-2-Amalgam, Kugelamalgam, Splitteramalgam) auf die Höhe der Quecksilberabgabe zu quantifizieren, wurden die Chargen „Amalcap Plus®“, „Contour®“, „Duragam®“ und „Dentargam®“ zur ersten Gruppe zusammengestellt. Der Unterschied zwischen den Chargen beschränkte sich dabei auf das verwendete Amalgam. Die Verarbeitung wie Trituration, Kondensation und Politur war für alle Prüfkörper identisch. Die Amalgame „Contour®“, „Duragam®“ und „Dentargam®“ wurden nur im ersten Versuch (siehe 5.2.1 f) verwendet, die Prüfkörper der anderen Versuchsreihen (siehe 5.2.2 ff) bestanden immer aus dem Amalgam „Amalcap Plus®“.
2. Gruppe: Die Prüfkörper der Chargen „Plan“, „20N/mm²“, „2N/mm²“ sowie „Kugelstopfer“ wurden in dieser Gruppe zusammengefasst, um den Einfluss des Stopfvorganges auf die Höhe der Quecksilberabgabe erfassen zu können. Die Prüfkörper wurden dabei mit unterschiedlichen Stopfdrücken und Instrumentarien hergestellt.
3. Gruppe: Hier sollte die Abhängigkeit der Quecksilberabgabe von der Qualität der Nachbearbeitung überprüft werden. Dazu wurden die Prüfkörper der Charge „Unpoliert“ getestet. Nach dem Versuch wurden die Prüflinge auf Hochglanz poliert und ein zweites mal dem Versuch unterzogen. Auf diese Weise sollten wie schon in der Gruppe 3 Unterschiede zwischen den Prüfkörpern auf die Qualität der Nachbearbeitung reduziert werden.
4. Gruppe: Diese Gruppe besteht nur aus der Charge „Alter“. Die Prüfkörper wurden nach Ablauf unterschiedlicher Zeitspannen geprüft, um die Alterung des Amalgams auswerten zu können. Es kamen dabei immer dieselben Prüflinge zum Einsatz, um andere Faktoren und Schwankungen bei der Herstellung der Füllung ausschließen zu können.
5. Gruppe: Es sollte abschließend der Aufbau einer Passivierungsschicht durch Oxidation der oberen Schichten des Metalls beobachtet werden. Dazu wurden die Prüfkörper der Charge „Planer Stopfer“ einmal dem Putzversuch unterzogen, um dann nach Ablauf von

fünf bis 120 Minuten die Quecksilberdampfabgabe über der trockenen Füllung zu messen.

Tabelle 3: Einteilung der hergestellten Prüfkörper in Gruppen, um Vergleiche zwischen den Herstellungsmethoden zu ermöglichen.

Gruppe	Variation	Verwendetes Amalgam	Beinhaltete Prüfkörper
Gruppe 1	Verwendetes Amalgam	Amalcap Plus® Contour® Duragam® Dentargam®	„Amalcap Plus®“ „Contour®“ „Duragam®“ „Dentargam®“
Gruppe 2	Stopfmethode	Amalcap Plus®	„20 N/mm ² “ „2 N/mm ² “ „Planer Stopfer“ „Kugelstopfer“
Gruppe 3	Nachbearbeitung der Oberfläche	Amalcap Plus®	„Unpoliert“ „Poliert“
Gruppe 4	Alter der Prüfkörper	Amalcap Plus®	„Alter“
Gruppe 5	Zeitpunkt der Messung nach dem Putzende	Amalcap Plus®	„Planer Stopfer“

4.2.2 Putzmaschine

Um die Beanspruchung und die daraus resultierende Quecksilberfreisetzung aus Amalgamfüllungen simulieren zu können, wurde eine Putzmaschine in der Zentralwerkstatt am Klinikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena nach eigenen Vorstellungen konstruiert und gebaut. Sie bestand aus zwei Komponenten: Die elektronische Steuerung und der mechanische Bauteil zur Fixierung der Prüflinge und der Bürsten, sowie zur Ausführung der Putzbewegungen (Abb. 2).

Die Steuerungseinheit enthielt die Stromversorgung mit abschaltbarem Netzteil zum Anschluss an die Stromversorgung (220V, 50Hz~), den Anschluss für den Motor, eine Kontrolltafel zur Einstellung der zu absolvierenden Putzzyklen, einen Geschwindigkeitsregler sowie Kontrollleuchten zur Anzeige des Betriebszustands. Vor Beginn des Versuches konnten so die Anzahl der Putzbewegungen sowie deren Frequenz eingestellt werden, bei Überschreiten der Putzfrequenz oder Erreichen der eingestellten Zyklenzahl schaltete sich das Gerät selbstständig ab. Das mechanische Bauteil besteht aus einem Motor sowie einem Getriebe zur Übersetzung in einen

lineare Vor- und Rückschubbewegung. Diese wird auf einen Schlitten übertragen, der vor der Halterung für die Prüfkörper angebracht ist (Abb. 3).

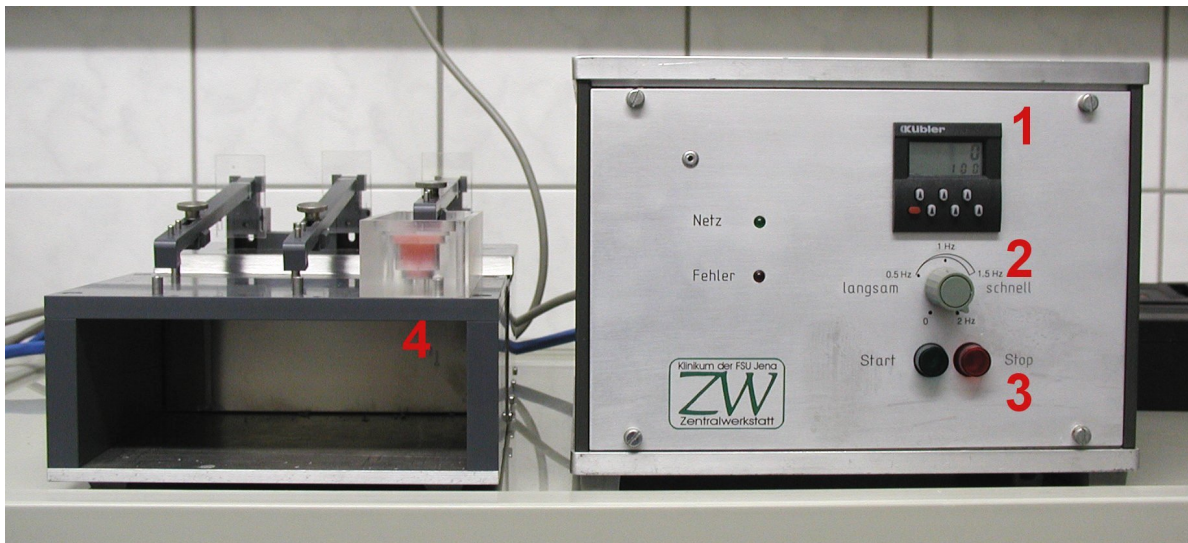


Abb. 2: Maschineller Aufbau zur Erzeugung der linearen Vor- und Rückschubbewegung. Rechts im Bild die Steuerungseinheit. Diese enthält einen Zähler mit Einstellmöglichkeit der zu absolvierenden Putzbewegungen (1), einen stufenlos regelbaren Geschwindigkeitsregler zur Einstellung der Putzfrequenz (2) sowie Taster zum Start und Abbruch der Putzbewegungen (3). Links im Bild der Schlitten mit der Aufnahme für die Prüfwannen (4).

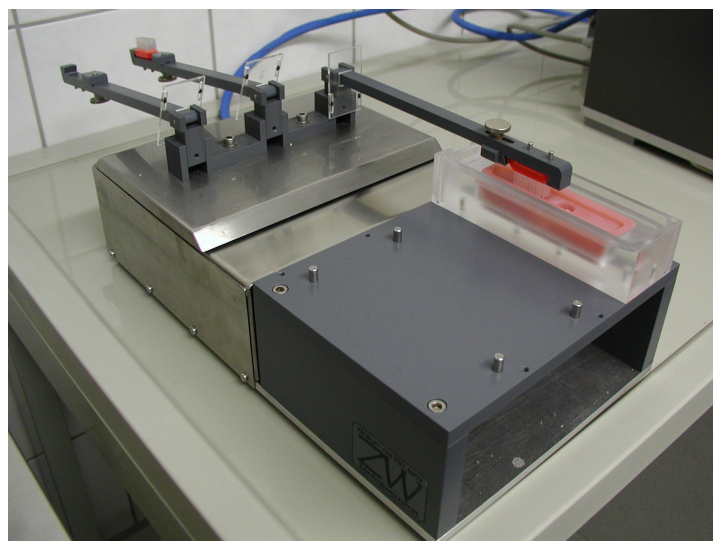


Abb. 3: Mechanisches Bauteil zur Ausführung der Linearbewegung. Am beweglichen Schlitten sind schwenkbare Arme zur Aufnahme der Bürstenköpfe angebracht (links oben), am starren Teil findet sich die Arretierung für die Putzwannen.

In der Höhe verstellbare Arme sollten zur Aufnahme und Positionierung der Bürstenköpfe sowie genormter Gewichte zur Regelung des Auflagedruckes innerhalb der Putzkammer dienen.

Die Putzmaschine ist durch diesen Aufbau in der Lage, eindimensionale Putzbewegungen entsprechend der horizontalen Putzmethode auszuführen. Im Rahmen dieses Versuches wurde auf eine komplexere zweidimensionale Führung verzichtet, da die horizontale Putzmethode bei der Mehrheit der Patienten die angewandte Putzmethode darstellt (Riethe 1974).

4.2.3 Halterung der Prüfkörper

Um eine Halterung für die Prüfkörper, einen Raum für die Quecksilberdampfmesung und eine Wanne für die Putzflüssigkeit zu erhalten, wurden drei Kammern hergestellt. Diese bestanden aus zwei Plexiglaskörpern. Der untere Bodenteil enthielt ein 9 cm lange, 2,1 cm breite und 1,5 cm tiefe eingefräste Rinne zur Aufnahme der Prüfkörper. Es wurden an der Unterseite Bohrungen zur exakten Positionierung und Fixierung am Testgerät angebracht, die Oberseite wurde derart ausgefräst, dass der zweite Plexiglaskörper luftdicht aufgesetzt werden konnte (Abb. 4).

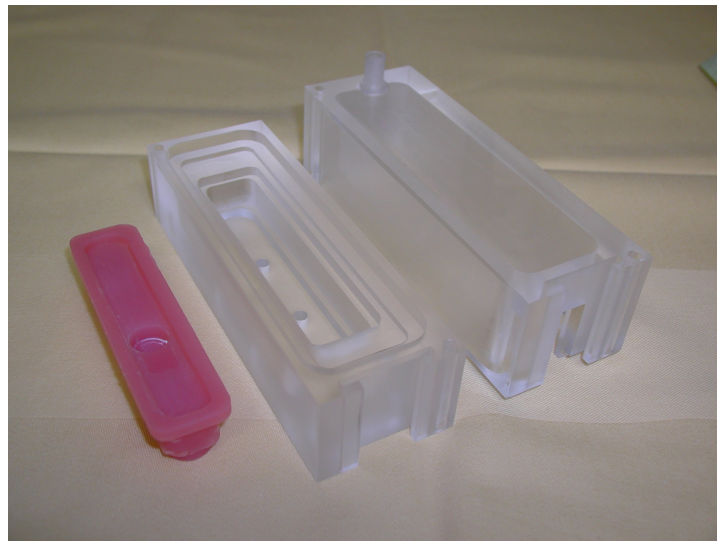


Abb. 4: Ansicht der Kammerteile. Von links nach rechts: Prüfkörperhalterung mit Bohrung für die Aufnahme der Prüfkörper. Daneben der Kammerboden mit Fräsung zur Aufnahme der Prüfkörperhalterung, rechts der Kammerdeckel.

Um das Sedieren von Putzkörpern aus der Putzflüssigkeit zu verhindern, musste die Menge der Flüssigkeit so reduziert werden, dass sie lediglich den Prüfkörper bedeckte. Um ein Abfließen der geringen Flüssigkeitsmenge zu verhindern, und um den kleinen Prüfkörper in der Testkammer zu fixieren, wurde passgenau für die Rinne des Bodenteils eine Halterung aus

Poly-Methyl-Methacrylat hergestellt. Diese wurde derart gefertigt, dass sie bündig mit dem Bodenteil abschloss. Dabei wurde in den Einsatz eine Vertiefung von 3 mm und einer Breite von 15 mm eingefräst, um die Putzflüssigkeit aufzunehmen. Eine Bohrung mit 12,5 mm Durchmesser und einer Tiefe von 5 mm wurde im Bewegungsbereich des Bürstenkopfes angebracht, in die die Prüfkörper passgenau eingelegt werden konnten (siehe Abb. 5).

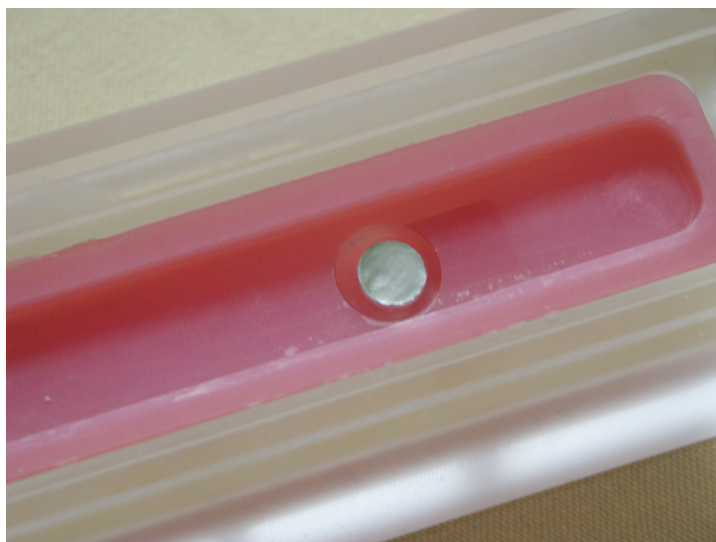


Abb. 5: Kammerunterteil mit eingelegter Halterung und Prüfkörper.

Insgesamt konnte so erreicht werden, dass 1. die Bürste keine schaubildenden Kanten überstreichen musste, 2. ein Sedieren von Putzkörpern während des Versuches verhindert wurde und 3. der Prüfkörper trotz der geringen Menge Flüssigkeit immer mit dieser bedeckt wurde.

Durch die Teilung des Prüfkörpers in die den Bürstenkopf führende Halterung und den kleineren, das Amalgam tragende Prüfstück konnte auch eine Trennung der sehr großen Kunststoffflächen vom Amalgam erfolgen, um nach der Reinigung eine möglichst gute Quecksilberfreiheit zu erreichen. Außerdem konnten die mit hohem Aufwand passgenau hergestellten Halterungen mehrfach verwendet werden.

Der Kammerdeckel wurde passend für das Bodenteil gefräst, um eine ungerichtete Luftzirkulation zwischen Kammer und Raumluft verhindern zu können. Die vordere Wand enthielt eine viereckige Aussparung, in die der Bürstenhalter der Putzmaschine eingelegt werden konnte. Gleichzeitig diente diese Öffnung als einziger Luftzutritt zur Kammer. Im hinteren Bereich der Abdeckung wurde eine Bohrung und ein Konus zur Befestigung des Saugschlauches angebracht. Durch diese Öffnung wurde die Kammerluft während des Versuches stetig abgesaugt (Abb. 6).

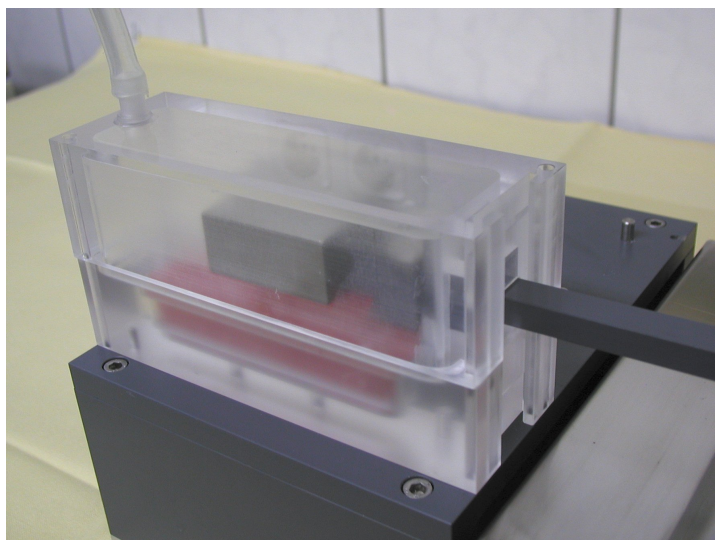


Abb. 6: Übersicht der geschlossenen Putzkammer. Rechts findet sich die Öffnung für die Bürstenhalterung und damit die Möglichkeit des Druckausgleiches, links der Absaugstutzen mit aufgesetztem PVC-Schlauch.

4.2.4 Bürstenköpfe

Für eine optimale Mundpflege müssen Zahnbürsten verwendet werden. Diese sollten einer Reihe von Anforderungen genügen, um eine erfolgreiche Zahnreinigung an allen Zähnen und Flächen durchführen zu können (siehe Tabelle 4). So soll der Bürstenkopf kurz sein, um auch distale Bereiche der Mundhöhle erreichen zu können (Barnarius et al., 1967). Die Borsten sollten nicht aus Naturfasern bestehen, da diese unregelmäßig stark sind, zu scharfkantigen Brüchen nach schneller Ermüdung neigen und vielen Keimen als Lebensraum dienen können. Im Gegensatz dazu sind künstlich hergestellte Fasern im Durchmesser regelmäßig bemessen, die Härte der Fasern kann somit gut beeinflusst werden. Durch die gute Bearbeitbarkeit können die Faserenden abgerundet werden, was Verletzungen am Zahnfleisch und unangenehme Sensationen vorbeugt. Sie sind ausgesprochen haltbar und verlieren erst nach langem Gebrauch die Stabilität und Form (Riethe 1974). Das Borstenfeld soll folgendermaßen beschaffen sein (Tabelle 4):

Aus den Borstendurchmessern und der Borstenlänge ergibt sich die Kraft, die notwendig ist, die Borsten abzubiegen. Die Zahnbürsten werden daher in Härtekategorien eingeteilt. Borsten mit einem Durchmesser von 0,2 bis 0,225 mm ergeben sehr weiche Borsten, Durchmesser von 0,225 bis 0,25 mm mittelharte und Durchmesser von 0,25 bis 0,3 mm harte bis extraharte Borsten. Da weiche Zahnbürsten wenig geeignet sind, Zahnbelag zu entfernen, und harte Borsten dazu neigen, ein unangenehmes Gefühl und dadurch Anwendungsfehler zu verursachen, werden sie nicht empfohlen (Riethe 1974).

Tabelle 4: Eigenschaften einer zur Mundpflege geeigneten Zahnbürste nach *Riethe (1974)*.

Borstenfeldlänge	15-33 mm
Borstenfeldbreite	7,5 – 11 mm
Anzahl der Büschel im Borstenfeld	$7 \pm 2 \times 2 \pm 3$
Borsten je Büschel	18
Borstenlänge	10 – 13 mm
Borstendurchmesser	0,2 – 0,3 mm

Für diesen Versuch wurden die Zahnbürsten „Dr. Best Flex Kurzkopf Mittel“ verwendet. Sie entspricht den Anforderungen an eine wirksame Zahnbürste. Das plane Borstenfeld erleichtert die optimale Ausrichtung des Bürstenkopfes auf die Ebene des Prüfkörpers. Abgewinkelte Schnittformen führten im Vorversuch zur mangelnden Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, da eine optimale Ausrichtung auf die Putzebene schlecht möglich war.



Abb. 7: Haltearme zur Fixierung der Bürstenköpfe. Nach Einlegen der Bürsten können die Arme auf die Prüfkammer umgeklappt und in der Höhe justiert werden.

Die Bürstenköpfe wurden vom Stiel abgetrennt. Die Schnittflächen wurden entgratet, um den Bürstenkopf in der dafür vorgesehenen Halterung fest und reproduzierbar verankern zu können (Abb. 7). Es wurde dabei beachtet, dass die Bürste mit allen Borsten gleichmäßig dem Prüfkörper auflag.

Die Reinigung der Bürsten war in diesem Versuch nicht ausreichend möglich. Nach den verschiedenen Reinigungsversuchen wie Abspülen oder Ultraschallbad konnten weiterhin signifikante Mengen an Quecksilber im Borstenfeld ermittelt werden. Daher wurden zu jedem Versuch neue Bürstenköpfe verwendet, die nach Versuchsende verworfen wurden.

An den Halterungen der Bürstenköpfe wurden über den Köpfen Pins angebracht, um ein Anbringen von Metallmassen zu ermöglichen. Mit diesen war es möglich, den Anpressdruck der Bürsten an die Prüfkörper während des Putzversuches festzulegen. Dieser ergab sich aus der Masse des Haltearmes, des Bürstenkopfes, der Metallmasse verrechnet mit dem physikalischen Hebel. Die Gesamtmasse lag so insgesamt bei 200 g.

Er lag damit im unteren Bereich der Auflagedrücke, die andere Autoren verwendeten (Weiland et al. 1988a). Er wurde jedoch gewählt, da niedrige Drücke zum Putzen empfohlen werden, um Schäden an der Zahnhartsubstanz und der Mundschleimhaut zu vermeiden.

4.2.5 Putzmedium

Zusätzlich zur alleinigen Verwendung einer Zahnbürste sollen bei der Mundhygiene zur Erhöhung der Reinigungswirkung ein abrasives Medium in Form von Zahnpasta verwendet werden. Die Anwendung moderner Zahnpasten zielt auf Belagentfernung, Karies- und Gingivitisprophylaxe, der Inhibition von Zahnsteinneubildung und der Beeinflussung von übersensiblen Zahnhälsen (Lange 1990, Riethe 1974). Zu diesem Zweck werden in den Zahnpasten verschiedene Zusatzstoffe verarbeitet (siehe Tabelle 5):

Die zur Zahnreinigung essentiellen Bestandteile der Zahnpasten sind die Putzkörper. Es handelt sich dabei um Partikel aus Kieselsäure, Kalziumkarbonat, Aluminiumhydroxid, Hydroxylapatit, PMMA oder anderen. Sie haben eine Größe von 3 - 15 µm und stellen 15 bis 60 Prozent der Gesamtmasse der Zahnpasta (Lange 1990, Riethe 1980). Durch den leichten Substanzabrieb führen sie zur Reinigung und Politur der Zahnflächen. Das Ausmaß des Abriebs hängt von der Größe, der Menge und der Form der in der Zahnpasta enthaltenen Partikel ab (Lange 1990). Zur Reihung der Zahnpasten nach ihrem Substanzabtrag wurden diese mittels der Radio-Dentin-Abrasions-Methode (RDA) vermessen, wenig abrasive Zahnpasten erzielten hier geringe Werte. Zahnpasten mit hohen RDA-Werten, meist sog. „Zahnweiss“-Produkte und Zahnpulver, neigen zu starken Abrieb an den Zahnflächen, sie sollten daher nicht regelmäßig zur Zahnreinigung verwendet werden (Lange 1990).

Tabelle 5: Inhaltsstoffe moderner Zahnpasten und deren Wirkung.

<i>Inhaltsstoff</i>	<i>Wirkungsrichtung</i>
Putzkörper	Abrieb von Belägen und Politur
Bindemittel	Erhält die Konsistenz und verhindert Entmischung
Schaummittel	Netzmittel zur besseren Wirkung der Flüssigkeit an der Zahnhartsubstanz
Zusatzmittel	Feuchthaltemittel, Lösungsmittel, Geschmacks- und Farbstoffe, Konservierungsmittel und Stabilisatoren.
Wirkstoffe	Fluoride zur Steigerung der Säureresistenz des Zahnschmelzes Kristallgrundstoffe wie Phosphat zur Remineralisation Zahnstein- und Kariesinhibitoren wie AHP Gingivatrope Substanzen wie Kamilleextrakt Antimikrobielle Substanzen

Im Versuch wurde die mittelabrasive Zahnpasta Meridol® verwendet. Sie enthält neben Siliziumhydroxid und siliziummodifizierten Dimethylathen gingivatrop sowie karieshemmende Substanzen und Amin- sowie Zinn(II)fluorid in einer Konzentration von 1400 ppm. Sie ist daher für den wirksamen Kariesschutz geeignet und zum täglichen Gebrauch zu empfehlen. Zur Herstellung einer im Versuch anwendbaren Flüssigkeit wurde das Gel in destilliertem quecksilberfreien Wasser aufgeschlemmt. Dabei wurden 80 ml Wasser mit 20 ml Zahnpasta vermischt. So entstand eine gut pipettierbare Flüssigkeit mit ausreichender Menge von Putzkörpern.

Im Versuch wurde aqua bidest verwendet, da bei Korrosionsversuchen keine Unterschiede zwischen Speichel und Wasser gefunden werden konnten (Mayer und Diehl 1976, Waldmeier et al. 1987), auch ist das Löslichkeitsprodukt für beide Flüssigkeiten gleich (Marek 1990). Der Transport von Quecksilber sowie seine Bindung an Speichelproteine ist möglich (Berglund 1990), da die Zusammensetzung des Speichels jedoch individuellen Schwankungen unterliegt, ist die Einschätzung der Beeinflussung durch künstlichen Speichel schwierig.

Im Versuch wurden 2 ml der homogen gemischten Putzflüssigkeit auf den Prüfkörper und die Halterung pipettiert. Nach Ablauf des Putzvorgangs wurde zirka 1 ml der Putzflüssigkeit abpipettiert und der Quecksilbermessung zugeführt, die restliche Flüssigkeit war größtenteils im Bürstenkopf verhaftet und konnte nicht aufgefangen werden.

4.2.6 Absauganlage

Um die bei den Putzversuchen entstehenden Quecksilberdämpfe quantifizieren zu können, wurde die Luft während des Versuches aus den Kammern abgesaugt. Zu diesem Zwecke wurden am hinteren Ende der Kammerdeckel Bohrungen und Koni angebracht. Hier wurden kurze Kunststoffschläuche befestigt. Am Vorderende der Kammer fand sich an der Stelle des Bürsteneintrittes eine weitere Öffnung, ein gerichteter Luftstrom durch die gesamte Kammer konnte so gewährleistet werden.

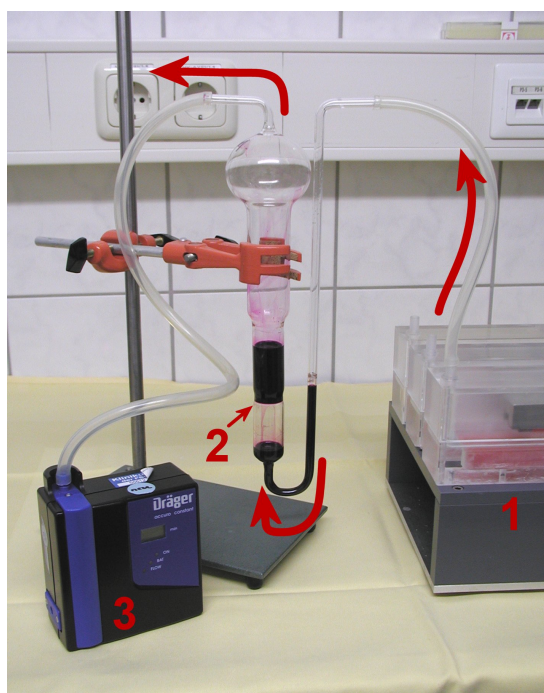


Abb. 8: Darstellung der Absauganlage für die Sammlung der Quecksilberdämpfe während des Versuches. Rechts im Bild die Putzkammern (1). Zur Vereinfachung wird lediglich eine von drei Absauganlagen dargestellt. Die Luft (rote Pfeile) strömt aus der Kammer durch die Glasfritte mit der Siebmembran (2) zur Pumpe (3).

Die Luft wurde mit einer Rate von 1 l/min während der gesamten Dauer des Versuches mittels einer Pumpe abgesaugt. Nach Olsson et al. ist für die gemessene Quecksilbermenge die Stärke des Luftstroms nicht entscheidend, es wird unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit das gesamte in diesem Zeitraum freigesetzte Quecksilber aufgefangen (Olsson et al. 1989, Berglund et al. 1988, Mackert 1987). Die Sammlung des Quecksilbers fand in Adsorbern statt (Abb. 8). Diese wurden mit 25 ml schwefelsaurer Kaliumpermanganat-Lösung beschickt. Durch eine Siebmembran wurde der Luftstrom in der Flüssigkeit fein verteilt. Atomares Quecksilber wird in

Kaliumpermanganatlösung zu ionisiertem Quecksilber oxidiert, wodurch es seinen Dampfdruck verliert, und in der Lösung gesammelt werden kann.

Die Flüssigkeit wurde unmittelbar nach Versuchsende der Quecksilberkonzentrationsmessung zugeführt.

4.3 Versuchsablauf

4.3.1 Putzversuch

Die gelagerten Prüfkörper wurden vorsichtig getrocknet und mit Alkohol abgewischt, um Quecksilberrückstände von den polierten Kunststoffoberflächen zu entfernen.

Danach wurden sie in die Bohrungen der Halterungen eingebracht. 2 ml der Putzflüssigkeit wurden auf die Prüfkörper pipettiert, die Bürstenköpfe aufgelegt und mit dem Gewicht 175 g beschwert. Dadurch kam eine Gesamtlast von 200 g auf dem Bürstenkopf zustande. Die Kammer wurde durch Aufsetzen der Deckel geschlossen und die Schläuche der Absaugung wurden angeschlossen.

Die Putzfrequenz lag bei Versuchspersonen bei 2,1 Hz (Lutz 1996). Bei einer Putzdauer von 3 Minuten putzt eine Person jeden Quadranten 45 Sekunden und führt dabei 90 Putzbewegungen aus. Dieser Wert wird in diesem Versuch der Anzahl der Überstreichungen einer einzelnen Amalgamfüllung gleichgesetzt.

Die Putzmaschine wurde daher auf eine Geschwindigkeit von 2 Hz und auf 100 Putzbewegungen programmiert und gestartet.

Nach Ablauf der Putzbewegungen wurde die Absaugung gestoppt und die Putzflüssigkeit abpipettiert.

Um den zeitlichen Verlauf der Quecksilberdampfabgabe beobachten zu können, wurden in einer weiteren Testreihe die Prüfkörper der fünften Gruppe vor dem Putzversuch trocken in die Kammer eingebracht, und freigesetzte Quecksilberdämpfe mittels der Absauganlage über 90 Sekunden gesammelt. Nach Durchführung eines Putzversuches wurden die Prüfkörper mit einem Papiertuch vorsichtig gereinigt, um anschließend in einer sauberen Kammer erneut der Quecksilberdampfmessung zugeführt zu werden. Diese Messungen wurden nach insgesamt fünf, 15, 30, 45, 60, 90 sowie 120 Minuten durchgeführt. Damit ließ sich ein detailliertes Profil des zeitlichen Verlaufs darstellen. Die Lagerung zwischen den einzelnen Messungen erfolgte zur Förderung der Oxidationsprozesse sowie zur Schaffung möglichst naturnaher Verhältnisse unter einem Wassertropfen (Ferracane et al. 1992). Dadurch konnte sowohl die Lösung von

Füllungsbestandteilen und damit die Grundlage der Oxidation als auch ein guter Sauerstoffzutritt gewährleistet werden.

4.3.2 Reinigung und Leerwerte

Da in der Versuchsreihe verschiedene Materialien zum Einsatz kamen (siehe Tabelle 6), musste vor Beginn der Messungen die Quecksilberfreiheit innerhalb des Versuchsaufbaus sichergestellt werden. Während der Versuche kamen folgende Materialien direkt in Kontakt mit der Putzflüssigkeit oder der abgesaugten Luft:

Tabelle 6: Für den Versuchsaufbau verwendete Materialien und deren Verwendung:

Material	Verwendung als
PMMA	Prüfkörperhalterung
Plexiglas	Kammerboden und -deckel
Epoxidharz „Epo-Fix“	Prüfkörper
Metall	Auflagegewicht
Nylon	Borsten
PVC	Absaugschläuche
aqua bidest	Grundlage Putzflüssigkeit und Absauganlage
Meridol	Putzmedium

Zwischen den Versuchen mussten sämtliche während des Versuches mit Quecksilber in Kontakt geratenen Elemente gereinigt werden, um Fehler durch additive Effekte in den darauf folgenden Versuchen zu vermeiden.

Die durch die Putzflüssigkeit am stärksten kontaminierten Kammerunterteile wurden nach Entfernung der Amalgam tragenden Prüfkörper gründlich abgespült und einem Ultraschallbad unterzogen. Hierbei wurden die Kammerunterteile für 10 Minuten in destilliertem quecksilberfreiem Wasser bei 45 °C getaucht, um dann für weitere 10 Minuten dem Ultraschall ausgesetzt zu werden. Diese Prozedur wurde 5 mal wiederholt. Die weniger verschmutzten Kammerdeckel wurden der gleichen Reinigung unterzogen, die geringere Kontamination machte jedoch nur 3 Zyklen notwendig.

Die nicht abnehmbaren Haltearme für die Bürstenköpfe sowie die metallenen Gewichte wurden mit einem Papiertuch und Alkohol abgewischt, um abgelagerte Quecksilberdämpfe zu entfernen. Die Reinigung der Glasfritten erfolgte nach der Aufbereitung der Kaliumpermanganatlösung für

die Quecksilberkonzentrationsbestimmung durch Spülung mit Schwefelsäure und destilliertem Wasser.

Die Prüfkörper wurden im Ultraschallbad bei 20°C für 15 Minuten dem Schall ausgesetzt, um das nach der Politur auf der Oberfläche des Kunststoffs verbliebene Quecksilber zu entfernen.

Die Bürstenköpfe konnten aufgrund ihrer großen Gesamtoberfläche nicht ausreichend von Quecksilber befreit werden, sie wurden nach dem Versuch verworfen und durch neue ersetzt.

Der Reinigungserfolg wurde vor sowie innerhalb der Versuchsreihe mehrmals überprüft. Dazu wurden in die Bohrungen amalgamfreie Prüfkörper eingelegt und der Versuch unter Einhaltung sämtlicher Versuchsbedingungen durchgeführt.

4.3.3 Messmethode

Im Versuch wurden für jeden Prüfkörper und jeden Durchgang zwei Proben gewonnen: die Putzflüssigkeit mit Abrieb der Amalgamfüllungen sowie gelöstem Quecksilber und 25 ml quecksilberhaltige Kaliumpermanganatlösung aus den Adsorbern.

Die Putzflüssigkeit wurde unmittelbar nach Versuchsende mit einem Vortexer gemischt und eine Menge von 0,1 ml wurde zur Messung aufbereitet.

Die Flüssigkeit aus den Adsorbern wurde vollständig der Messung zugeführt.

Zur Messung der Quecksilberkonzentrationen wurde die Kalddampf-Atom-Absorptions-Spektrometrie (AAS) verwendet. Die Nachweisgrenze betrug 0,1 ng/ml.

Die auf diesem Wege erhaltenen Werte für den Quecksilbergehalt der Putzflüssigkeiten waren Konzentrationen in ng/ml. Diese wurden unter Berücksichtigung der eingesetzten Menge Zahnpastenaufschlemmung von zwei Millilitern und der Füllungsfläche von 50,3 mm² in die während der Versuchsdauer freigesetzten Menge Quecksilber je Füllungsfläche umgerechnet, um den Vergleich der Werte mit denen anderer Autoren zu ermöglichen.

$$\frac{\text{Quecksilberkonzentration}(\text{ng/ml}) \cdot 2 \text{ ml}}{50,3 \text{ mm}^2} = \text{Quecksilberfreisetzung} \frac{\text{ng}}{\text{mm}^2}$$

Die Messwerte für den Quecksilbergehalt in der abgesaugten Luft entsprachen der Gesamtmasse des innerhalb des Versuchszeitraumes über der 50,3 mm² großen Füllung freigewordenen Quecksilberdampfes in ng. Auch diese wurden unter Berücksichtigung der Versuchsdauer von 50 sek und der Füllungsfläche in flächen- und zeitbezogene Werte umgewandelt, um die Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu gewährleisten.

$$\frac{\text{Quecksilbermasse}(\frac{\text{ng}}{\text{min}}) \cdot 1,2}{50,3 \text{ mm}^2} = \text{Quecksilberdampffreisetzung} \frac{\text{ng}}{\text{mm}^2 \cdot \text{min}}$$

4.4 Statistische Auswertung

Zur Auswertung und Darstellung der erhobenen Messwerte wurde ein IBM Rechner mit Windows 98TM-Betriebssystem und das Programm „SPSS for Windows“ Version R 10.1.3 verwendet.

Um den Vergleich der Messwerte zueinander zu ermöglichen, wurde für jede Wertegruppe der Median, das heißt, das 50% Perzentil bestimmt. Dieser ist robust gegen Ausreißer und auch bei kleinen Datenmengen und unklarer Verteilung der Messwerte geeignet (Sachs 1992, Hüstler und Zimmermann 1996). Die Prüfung der erhobenen Messwerte auf eine Normalverteilung wurde nicht vorgenommen, da die Anzahl der Werte in einem Versuch mit sechs zu gering ist.

Um zwischen den Wertegruppen signifikante Unterschiede untereinander aufzufinden, wurden statistische Analysen zur Feststellung von Zugehörigkeiten zu gemeinsamen Grundgesamtheiten durchgeführt. Auf Grund der ungewissen Verteilung der Messwerte wurden für mehrere Stichproben der Kruskal-Wallis-Test (H -Test) und für zwei Stichproben der Mann-Whitney-Test (U -Test) durchgeführt. Als statistisch signifikant galt dabei die Ablehnung der Annahme der gemeinsamen Zugehörigkeit der Wertegruppen zu einer Grundgesamtheit mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95%. Einzelwerte, die unverhältnismäßig stark von der jeweilig erhobenen Wertegruppe abweichen, wurden als Ausreißer definiert und im Boxplot als solche gekennzeichnet. Sie fanden jedoch bei der Suche nach statistisch signifikanten Unterschieden in den U- und H- Tests Berücksichtigung.

Zur Einschätzung der Abhängigkeit von Messwerten untereinander oder von der Zeit wurde der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman ermittelt. Dieser ermittelt auch bei unklarer Verteilung der Messwerte, ob Trends in den Datenreihen vorhanden sind.

Die Messwerte für die Quecksilberkonzentrationen des Putzmediums sowie der Absaugung wurden gleichzeitig erhoben, jedoch zur besseren Übersicht getrennt in Boxplotdiagrammen dargestellt. Dabei wurden sowohl die oberen und unteren Extremwerte, als auch der Median und die 25% und 75% Perzentile zur Einschätzung des Streubereiches dargestellt. In drei Versuchen wurde zusätzlich die Darstellung als Streudiagramm zur Ermittlung von Regressionsgraphen gewählt. Zusätzlich zur Regression wurden der Korrelationskoeffizient r und das Bestimmtheitsmaß $B=r^2$ errechnet.

5 Ergebnisse

5.1 Leerwertmessungen

Innerhalb der Versuchsreihe wurden Leerwertmessungen durchgeführt, um die Quecksilberfreiheit nach der Reinigung kontrollieren zu können. Der Versuchsaufbau sowie die Versuchsbedingungen entsprachen dabei denen der Hauptversuche. Da jedoch nur drei Kammern für den Versuch verwendet wurden, wurde die Leerwertmessung jeweils nur mit drei Messwerten durchgeführt. Als Prüfkörper wurden Epoxidharzkörper aus „Epo-Fix“ ohne Bohrungen und Amalgamfüllungen verwendet.

Die Leerwertmessungen vor Versuchsbeginn ergaben für alle Versuche Werte unterhalb der Nachweisgrenze. Dieses Ergebnis wurde im Rahmen dieser Versuchsreihe als Bestätigung der Quecksilberfreiheit der verwendeten Materialien gewertet.

Zwischen den einzelnen Versuchen wurde die Quecksilberfreiheit des Versuchsaufbaus durch weitere Leerwertmessungen kontrolliert.

5.2 Hauptversuche

5.2.1 Legierungsart

5.2.1.1 Quecksilber im Putzmedium

Tabelle 7: Einzelwerte und Perzentile des in das Putzmedium freigesetzten Quecksilbers in ng/mm^2 Füllung.

<i>Amalgam</i>	<i>Einzelmesswerte in ng/mm^2 Füllungsoberfläche</i>						<i>Perzentile</i>		
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>25</i>	<i>50</i>	<i>75</i>
<i>Amalcap Plus®</i>	19,52	22,74	20,59	20,48	21,99	22,52	20,48	21,29	22,52
<i>Contour®</i>	12,62	14,77	15,9	15,74	17,25	15,74	14,77	15,74	15,6
<i>Dentargam®</i>	13,8	19,4	17,14	16,82	22,52	21,34	16,82	18,27	21,34
<i>Duragam®</i>	14,45	19,4	21,45	17,57	19,72	21,99	17,57	19,56	21,45

Die Messwerte der Quecksilberfreisetzung in die Putzflüssigkeit unterschieden sich je nach verwendetem Amalgam. Die höchste Freisetzung zeigte sich beim Amalcap Plus® mit $21,29 \text{ ng/mm}^2$. Etwas niedriger, jedoch im selben Bereich fanden sich die Messwerte für die Amalgame Duragam® und Dentargam®. Die Mediane lagen mit $19,56$ bzw. $18,27 \text{ ng/mm}^2$ dicht

bei diesem Wert, signifikante Unterschiede konnten nicht gefunden werden. Auffällig war die geringe Freisetzung aus dem Amalgam Contour®, der Median der Messwerte lag bei 15,98 ng/mm² Füllungsoberfläche (Tabelle 7 und Abb. 9). Signifikante Unterschiede ließen sich hier zum Amalgam Amalcap Plus® ($p < 0,01$) und Duragam® ($p < 0,05$) finden.

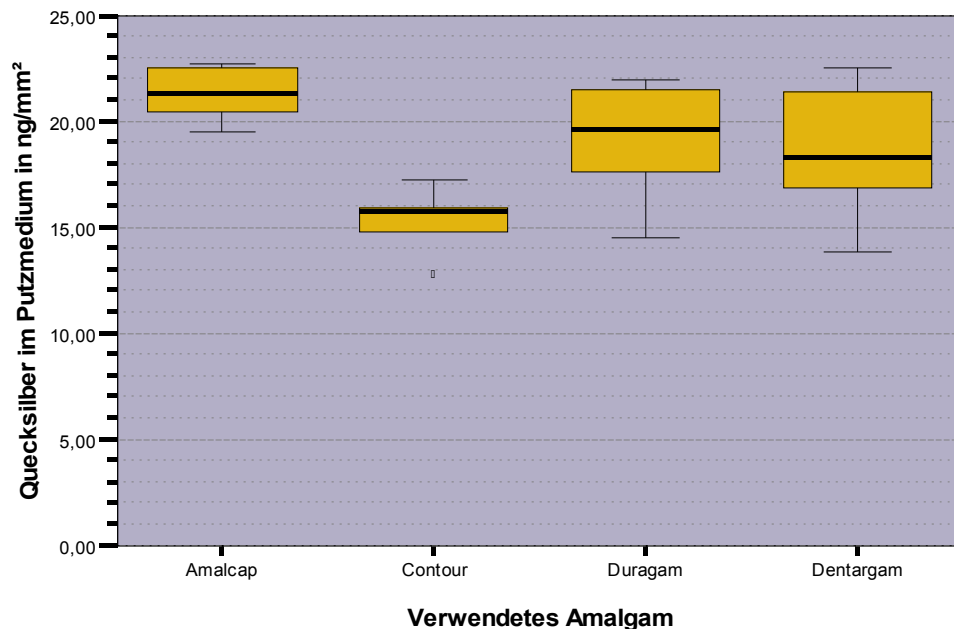


Abb. 9: Quecksilber im Putzmedium abhängig vom verwendeten Amalgam.

5.2.1.2 Quecksilberdampf

Tabelle 8: Einzelwerte und Perzentile der Quecksilberdampffreisetzung in ng/(min·mm²).

Amalgam	Einzelmesswerte in ng/(min·mm ²)						Perzentile		
	1	2	3	4	5	6	25	50	75
Amalcap Plus®	0,201	0,329	0,361	0,265	0,233	0,329	0,233	0,297	0,329
Contour®	0,217	0,217	0,345	0,265	0,201	0,377	0,217	0,241	0,345
Duragam®	0,201	0,426	0,538	0,345	0,393	0,538	0,345	0,410	0,538
Dentargam®	0,185	0,201	0,329	0,153	0,233	0,393	0,185	0,217	0,329

Die Verteilung der Messwerte des Quecksilberdampfes unterscheidet sich von der Verteilung der Quecksilberwerte im Putzmedium. Hier fanden sich die Messwerte für die Amalgame Amalcap Plus®, Contour® und Dentargam® im selben Wertebereich (Tabelle 8). Die Mediane der drei Amalgame lagen gemessen an der Streubreite der Einzelwerte dicht beieinander, signifikante Unterschiede fanden sich nicht. Die Messwerte für das Amalgam Duragam® lagen hier oberhalb der der anderen Amalgame, der Median mit 0,41 ng/(min·mm²) ist der höchste in diesem

Versuch (Abbildung 10). Ein signifikanter Unterschied konnte jedoch nur zwischen den Werten der Amalgame Duragam® und Dentargam® gefunden werden ($p < 0,05$).

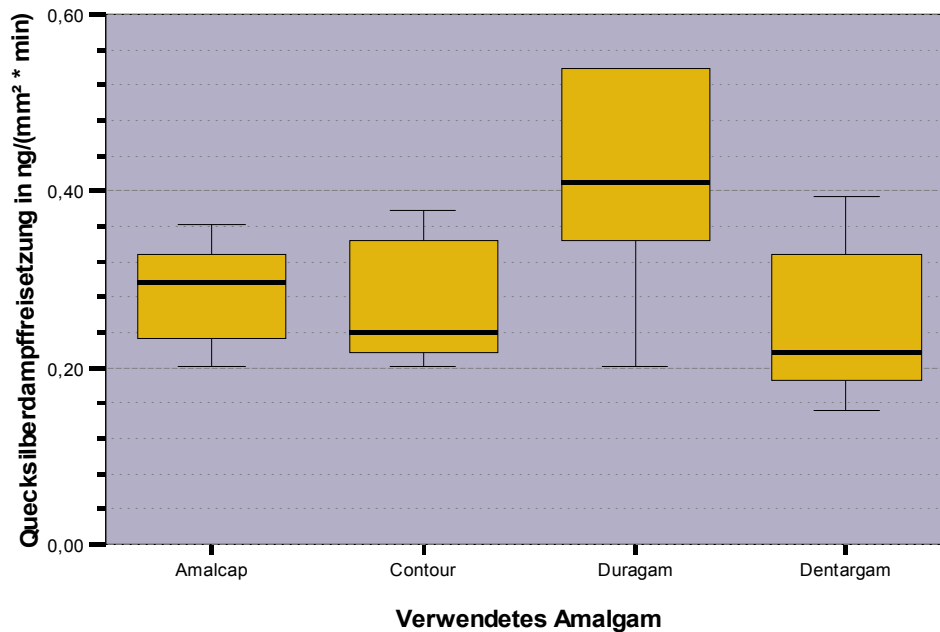


Abb. 10: Quecksilberdampffreisetzung in Abhängigkeit vom verwendeten Amalgam.

5.2.2 Verarbeitungsqualität

5.2.2.1 Quecksilber im Putzmedium

Tabelle 9: Einzelwerte und Perzentile des in das Putzmedium freigesetzten Quecksilbers in ng/mm^2 Füllung.

Charge	Einzelmesswerte in ng/mm^2 Füllungsoberfläche						Perzentile		
	1	2	3	4	5	6	25	50	75
Planer Stopfer.	19,52	22,74	20,59	20,48	21,99	22,52	20,49	21,29	22,53
Kugelstopfer	21,28	19,67	22,2	14,99	19,56	20,53	19,56	20,1	21,28
20 N/mm ²	18,97	18,49	21,5	14,99	18,7	22,42	18,49	18,84	21,5
2 N/mm ²	17,89	19,74	19,19	19,94	18,59	22,63	18,59	19,46	19,94

Die Streubreite der erhobenen Werte war hoch. Ein Einfluss der Verarbeitung auf die Quecksilberfreisetzung war nicht erkennbar.

Die unnormiert handfest mit planem Instrument gestopften Prüfkörper wiesen eine geringfügig höhere Quecksilberabgabe als die anderen in diesem Versuch untersuchten Prüfkörper auf.

So lag der Median dieser Messwerte mit $21,29 \text{ ng/mm}^2$ um $1,19$ bis $2,35 \text{ ng/mm}^2$ höher als die Werte der anderen Messungen. Die Quecksilberfreisetzung der mit planem Stopfer gefertigten Prüfkörper wies jedoch auch die geringste Streuung auf, die Streubreite der Werte der Chargen „ 20 N/mm^2 “, „ 2 N/mm^2 “ und „Kugelstopfer“ lagen dagegen im Bereich von $4,74$ bis $7,43 \text{ ng/mm}^2$ (Tabelle 9).

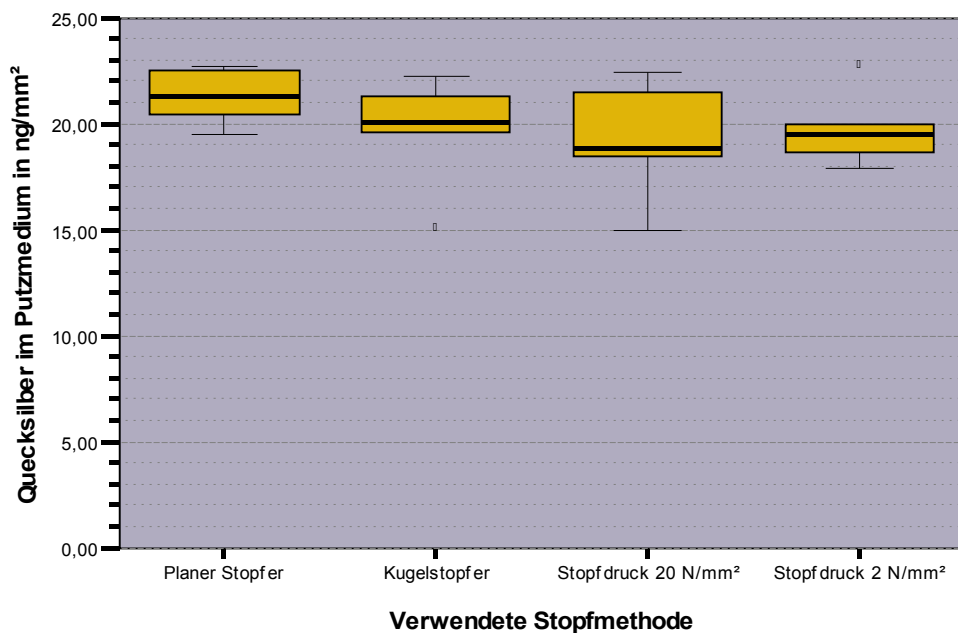


Abb. 11: Quecksilberfreisetzung in die Putzflüssigkeit in Abhängigkeit von der verwendeten Stopfmethode.

Für die Charge „Kugelstopfer“ traten Werte auf, die im Bereich der Werte der Charge „Plan“ lagen. Lediglich der untere Extremwert mit $14,99 \text{ ng/mm}^2$ lag weit unterhalb des Wertebereichs und wurde als Ausreißer definiert.

Der Median der Werte der Charge „ 2 N/mm^2 “ lag mit $19,46 \text{ ng/mm}^2$ nur geringfügig über dem der Charge „ 20 N/mm^2 “ mit $18,84 \text{ ng/mm}^2$ (siehe Abbildung 11). Diese geringe Differenz lässt im Zusammenhang mit der hohen Streubreite die Annahme eines Unterschiedes zwischen den Quecksilberfreisetzungen bei den beiden Stopfmethoden nicht zu, eine Unterscheidung auf signifikantem Niveau war für keine der Stopfmethoden möglich.

5.2.2.2 Quecksilberdampf

Tabelle 10: Einzelwerte und Perzentile der Quecksilberdampfmessung in $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$.

Charge	Einzelmesswerte in $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$.						Perzentile		
	1	2	3	4	5	6	25	50	75
Planer Stopfer.	0,201	0,329	0,361	0,265	0,233	0,329	0,233	0,297	0,329
Kugelstopfer	0,329	0,329	0,650	0,217	0,522	0,763	0,329	0,426	0,650
20 N/mm^2	0,217	0,361	0,554	0,233	0,249	0,442	0,233	0,305	0,442
2 N/mm^2	0,185	0,233	0,458	0,233	0,217	0,393	0,217	0,233	0,393

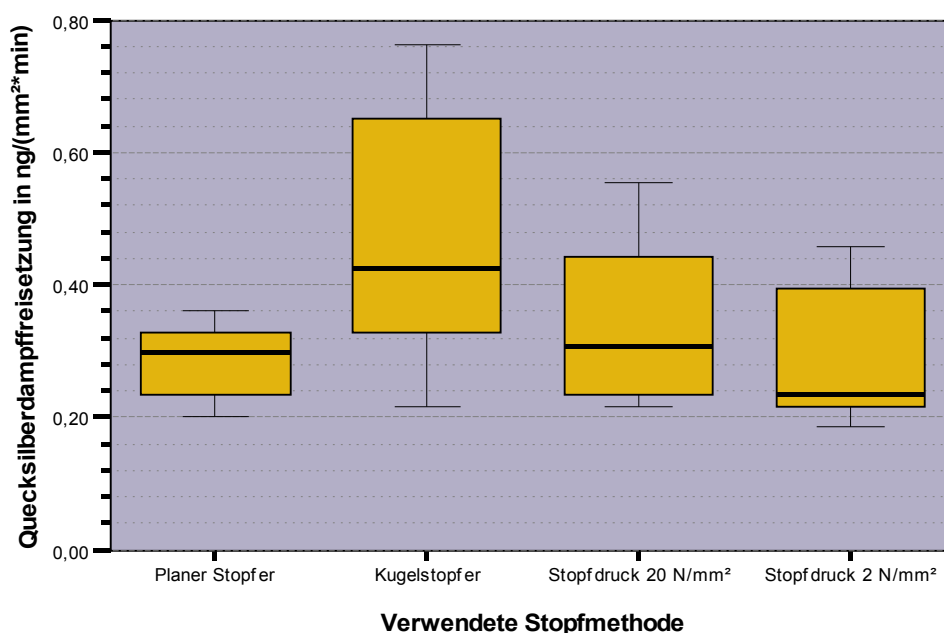


Abb. 12: Quecksilberdampffreisetzung in Abhängigkeit von der Stopfmethode.

Die Mediane der Messwerte für die Quecksilberdampffreisetzung fanden sich relativ dicht bei einander. So lagen die Mediane der Chargen „Planer Stopfer“ und „20 N/mm^2 “ bei 0,297 bzw. 0,305 $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$ auf dem gleichen Niveau. Auch der Median der Messwerte der mit geringem Anpressdruck von 2 N/mm^2 lagen mit 0,233 $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$ nur geringfügig unterhalb der beiden anderen Werte. Lediglich der Median der Charge „Kugelstopfer“ war mit 0,426 $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$ um 0,12 $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$ höher als die der anderen Chargen. Dabei trat vor allem bei den mit Kugelstopfer gefertigten Füllungen eine starke Streuung auf, hier lagen die Werte der Charge „Kugel“ zwischen 0,217 und 0,763 $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$ (siehe Tabelle 10 und

Abb. 12). Statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Quecksilberdampfabgaben traten in keinem Fall auf.

5.2.3 Oberflächenbearbeitung

5.2.3.1 Quecksilber im Putzmedium

Tabelle 11: Einzelwerte und Perzentile des in das Putzmedium freigesetzten Quecksilbers in ng/mm^2 Füllung.

Charge	Einzelmesswerte in ng/mm^2 Füllungsoberfläche						Perzentile		
	1	2	3	4	5	6	25	50	75
Unpoliert	20,64	22,36	24,25	22,95	26,29	25,32	22,36	23,6	25,32
Poliert	21,02	19,19	19,83	21,88	26,49	19,08	19,08	19,51	21,02

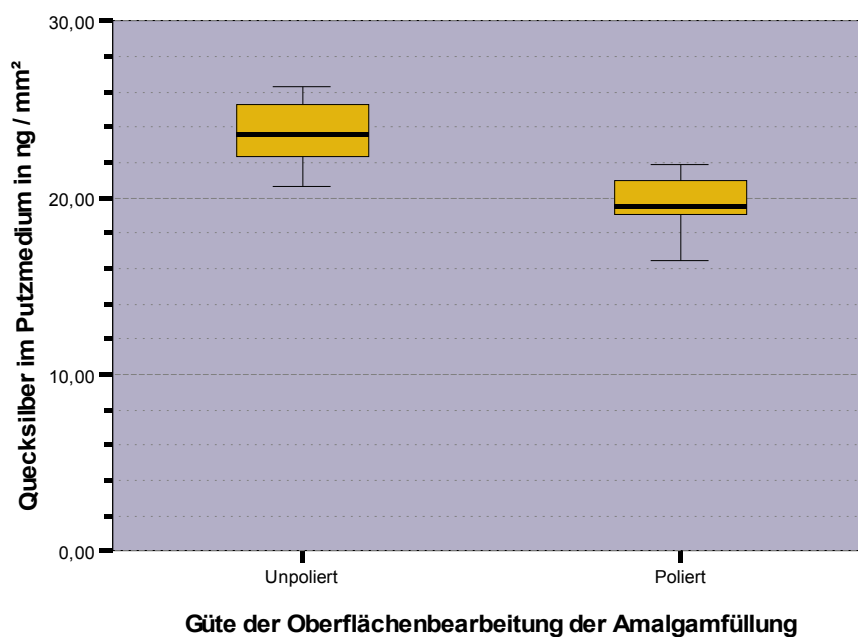


Abb. 13: Quecksilberabgabe in die Putzflüssigkeit in Abhängigkeit von der Politur der Füllungsoberfläche.

Die Nachbearbeitung der Oberfläche der Amalgamfüllungen hatte Einfluss auf die Quecksilberfreisetzung in die Putzflüssigkeiten. So lag der Median der Messwerte der unpolierten Prüfkörper mit $23,60 \text{ ng/mm}^2$ Füllungsoberfläche um $4,09 \text{ ng/mm}^2$ bzw. 18% höher als der der polierten Prüfkörper mit $19,51 \text{ ng/mm}^2$. Die Streubreite der Messwerte war für beide Versuche relativ gering, lag jedoch mit $5,39$ bzw. $5,65 \text{ ng/mm}^2$ leicht über dem Betrag der

Differenz der Mediane (Tabelle 11, Abb. 13). Dennoch konnte ein signifikanter Unterschied ($p < 0,01$) gefunden werden.

5.2.3.2 Quecksilberdampf

Tabelle 12: Einzelwerte und Perzentile der Quecksilberdampfmessung in $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$.

Charge	Einzelmesswerte in $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$						Perzentile		
	1	2	3	4	5	6	25	50	75
Unpoliert	0,217	0,474	0,650	0,265	0,634	0,570	0,265	0,522	0,634
Poliert	0,233	0,249	0,586	0,249	0,297	0,409	0,249	0,273	0,409

Die Messwerte aus der abgesaugten Luft überdecken einen sehr großen Bereich (siehe Tabelle 12). Insbesondere der Wertebereich der unpolierten Prüfkörper lag zwischen 0,217 und 0,65 $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$. Ähnlich hoch war die Streubreite der Werte der polierten Prüfkörper, hier fand sich jedoch nur der obere Wert mit großem Abstand zum Medianwert. Die Differenz zwischen den Medianen der Messwerte war hoch, so lag der Median für die unpolierten Prüfkörper mit 0,522 $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$ um 0,25 $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$ über dem der polierten Prüfkörper mit 0,273 $\text{ng}/(\text{min}\cdot\text{mm}^2)$ (siehe Abbildung 14). Diese Differenz war die höchste innerhalb dieser Arbeit. Durch die großen Wertebereiche kam es nicht zu Unterschieden zwischen den Messwerten auf statistisch signifikanten Niveau.

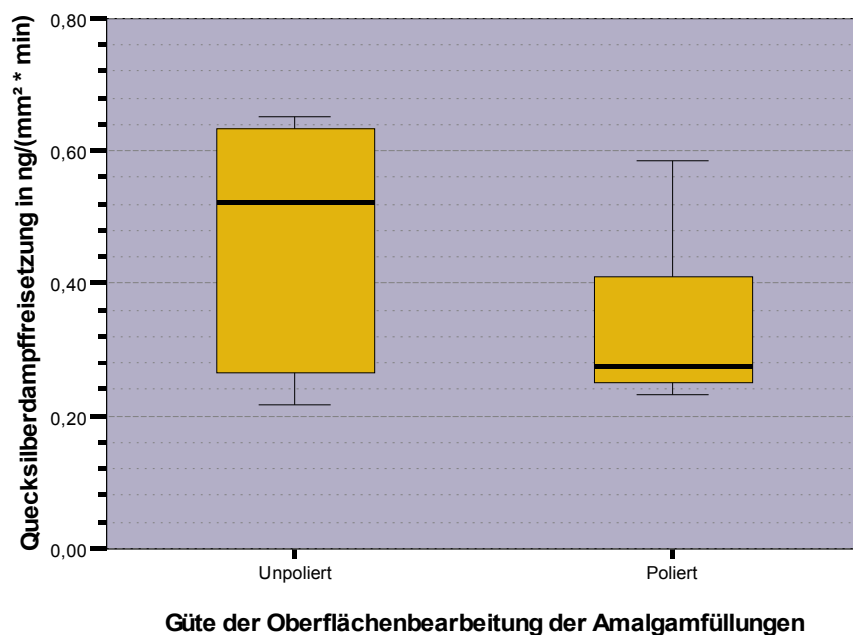


Abb. 14: Quecksilberdampffreisetzung in Abhängigkeit von der Politur der Füllungsoberfläche.

5.2.4 Alter der Prüfkörper

5.2.4.1 Quecksilber im Putzmedium

Tabelle 13: Einzelwerte und Perzentile des in das Putzmedium freigesetzten Quecksilbers in ng/mm^2 Füllung.

Zeitpunkt	Einzelmesswerte in ng/mm^2 Füllungsoberfläche						Perzentile		
	1	2	3	4	5	6	25	50	75
1 Tag	22,63	23,55	23,06	25,43	20,91	25,00	22,63	23,30	25,00
3 Tage	20,21	20,91	21,02	19,72	17,57	23,76	19,72	20,56	21,02
7 Tage	19,29	20,32	21,12	16,71	18,00	18,76	18,00	19,02	20,32
14 Tage	20,85	19,46	19,19	11,49	18,92	16,23	16,23	19,05	19,46

Die Lagerungsdauer der Prüfkörper nahm Einfluss auf die Quecksilberfreisetzung in die Putzflüssigkeit. Eine Abnahme der freigesetzten Quecksilbermenge während der ersten sieben Tage nach Füllungslegung ist erkennbar. Die Streubreite der Messwerte ist an den Messzeitpunkten hoch, vor allem die Werte nach 14 Tagen reichen von $11,49 \text{ ng/mm}^2$ bis $20,85 \text{ ng/mm}^2$ (siehe Tabelle 13 und Abb. 15). Die Extremwerte der nach 72 Stunden erhobenen Messwerte wurden als Ausreißer definiert.

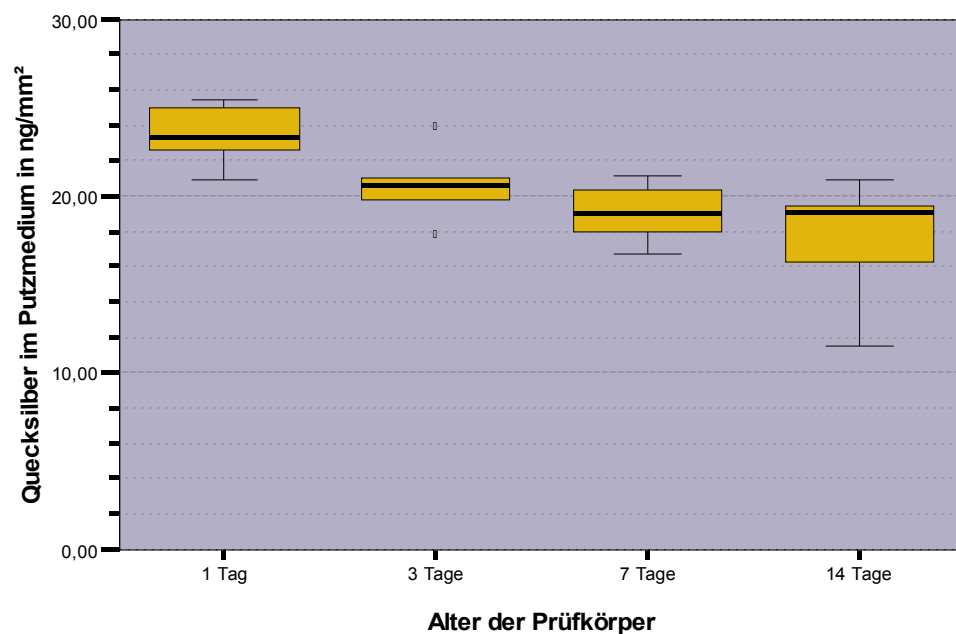


Abb. 15: Quecksilberfreisetzung in das Putzmedium in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper.

Im Vergleich der Messwerte nach 24 Stunden mit den Messwerten nach 3 Tagen zeigte sich eine signifikante Reduktion ($p < 0,05$), im Vergleich der Freisetzung nach 24 Stunden zu den Messwerten nach 7 und 14 Tagen eine hochsignifikante Reduktion ($p < 0,01$) der Quecksilberfreisetzung. Die Abnahme der Quecksilberkonzentrationen zwischen den einzelnen Messterminen war gering, nach 72 Stunden war diese nicht signifikant ($p > 0,05$). Des Weiteren erfolgte die Abnahme der Quecksilberkonzentration im Putzmedium nicht linear, sondern verringerte sich im Verlaufe der Versuchsreihe. So nahmen die Medianwerte innerhalb der ersten drei Tage von $23,30 \text{ ng/mm}^2$ Füllungsoberfläche nach 24 Stunden um $2,74 \text{ ng/mm}^2$ auf $20,56 \text{ ng/mm}^2$ nach 72 Stunden ab, danach jedoch änderten sie sich nur um $1,54 \text{ ng/mm}^2$ auf $19,02 \text{ ng/mm}^2$ am siebten Tag. Zwischen den Messungen am siebten und vierzehnten Tag nach Füllungslegung kam es nicht mehr zur Verringerung der Messwerte. Die größte Abnahme der Messwerte konnte zwischen dem ersten und siebten Tag gefunden werden, sie betrug $4,28 \text{ ng/mm}^2$, dies entspricht 18% des Ausgangswertes.

Um die Entwicklung der Messwerte mathematisch beschreiben zu können, wurde eine Regression durchgeführt. Da die Mediane nicht linear abnehmen, wurde die Näherung mit Hilfe des natürlichen Zerfalls nach *Euler* vorgenommen (siehe Abbildung 16).

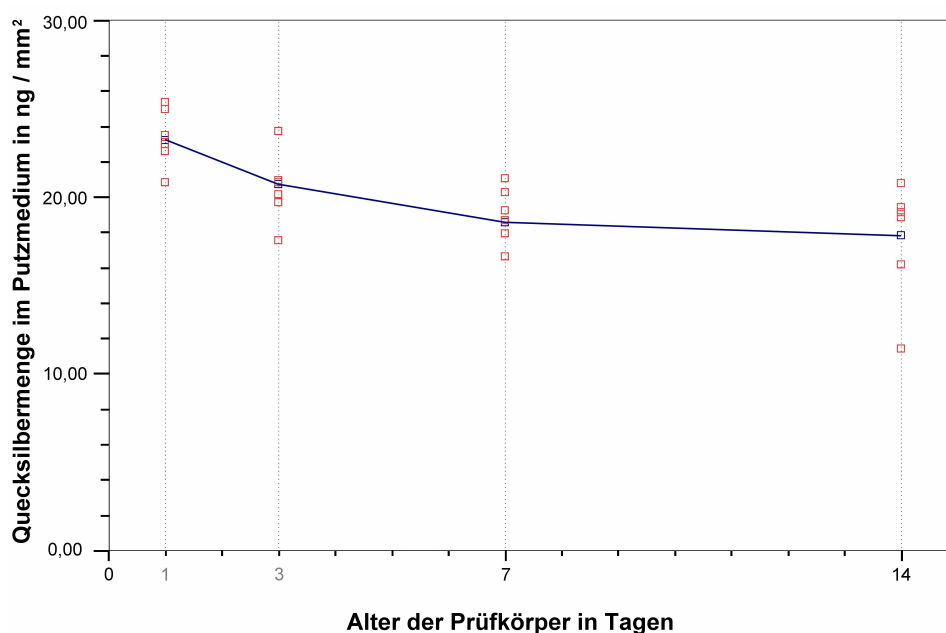


Abb. 16: Streudiagramm mit Darstellung der Quecksilberfreisetzung in das Putzmedium in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper (rot) und der Regressionsgraphen (blau). Die Zeitachse ist linear geteilt.

Die beste mathematische Beschreibung des Zusammenhangs stellt die Formel

$$y = 17,75 \frac{\text{ng}}{\text{mm}^2} + 7,53 \cdot e^{(-0,31 \text{ over } h \cdot t)}$$

dar, wobei y der zu erwartende Wert, und t das Alter der Füllung in Tagen ist.

Der Korrelationskoeffizient r betrug 0,7. Es konnten jedoch lediglich 50% der Schwankungen der Messwerte auf die Alterung zurückgeführt werden, das Bestimmtheitsmaß $B=r^2$ betrug 0,505.

5.2.4.2 Quecksilberdampf

Tabelle 14: Einzelwerte und Perzentile der Quecksilberdampffreisetzung in $\text{ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$.

Zeitpunkt	Einzelmesswerte in $\text{ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$						Perzentile		
	1	2	3	4	5	6	25	50	75
24 Stunden	0,297	0,361	0,570	0,377	0,281	0,409	0,297	0,370	0,409
72 Stunden	0,233	0,297	0,361	0,233	0,169	0,442	0,233	0,265	0,361
7 Tage	0,201	0,265	0,345	0,249	0,281	0,201	0,201	0,257	0,281
14 Tage	0,265	0,233	0,377	0,169	0,169	0,313	0,169	0,249	0,313

Wie für die Quecksilberwerte der Putzflüssigkeit ließ sich auch für die der Absaugung eine Beeinflussung durch die Lagerung der Prüfkörper erkennen. Die Streuung der Werte war jedoch größer und die Überlappungen der Werte stärker ausgeprägt. Vor allem die am ersten und dritten Tage gewonnenen Werte überspannen Bereiche von 0,281 bis 0,57 $\text{ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ (nach einem Tag) und von 0,169 bis 0,377 $\text{ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ (nach 14 Tagen), diese Spannen übertreffen die Differenzen zwischen den Medianen. Ähnlich wie bei den Werten für die Putzflüssigkeiten erfolgte die Verringerung der Quecksilberdampfkonzentration in der abgesaugten Luft nicht konstant, sondern hauptsächlich innerhalb der ersten drei Tage. Hier nahm der Median der Quecksilberfreisetzung in die Luft von 0,37 $\text{ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ nach 24 Stunden um 0,1 $\text{ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ auf 0,265 $\text{ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ nach 72 Stunden ab. In den folgenden Tagen verringerte sich der Median der Messwerte nur noch um 0,08 $\text{ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ zum siebenten Tag (siehe Tabelle 14 und Abbildung 17).

Die zeitlich benachbart erhobenen Messwerte unterscheiden sich nicht signifikant. Für die Werte vom ersten und siebenten Tag lassen sich signifikante Unterschiede feststellen ($p < 0,05$). In diesem Zeitraum erfolgte die betragsmäßig größte Abnahme des Quecksilberdampfes um 0,18 $\text{ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$. Dies entspricht 30 Prozent des Ausgangswertes. Der Zusammenhang zwischen Messzeitpunkt und Quecksilberdampffreisetzung war hoch signifikant ($p < 0,01$).

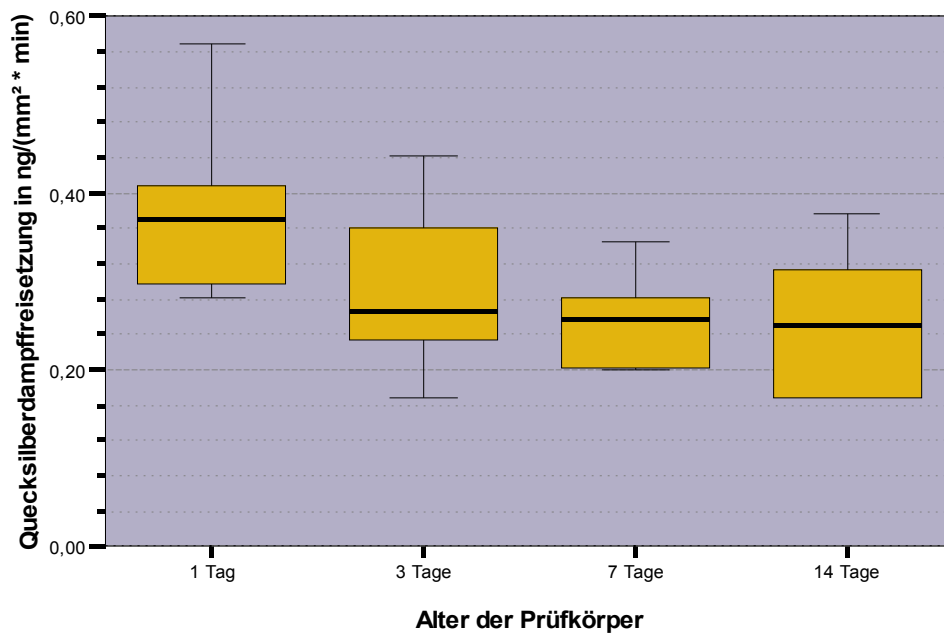


Abb. 17: Quecksilberdampffreisetzung in Abhängigkeit vom Alter der Amalgamfüllungen.

Um den zeitlichen Verlauf der Messwerte beschreiben zu können, wurde die Darstellung im Streudiagramm sowie eine nichtlineare Regression durchgeführt (siehe Abbildung 18).

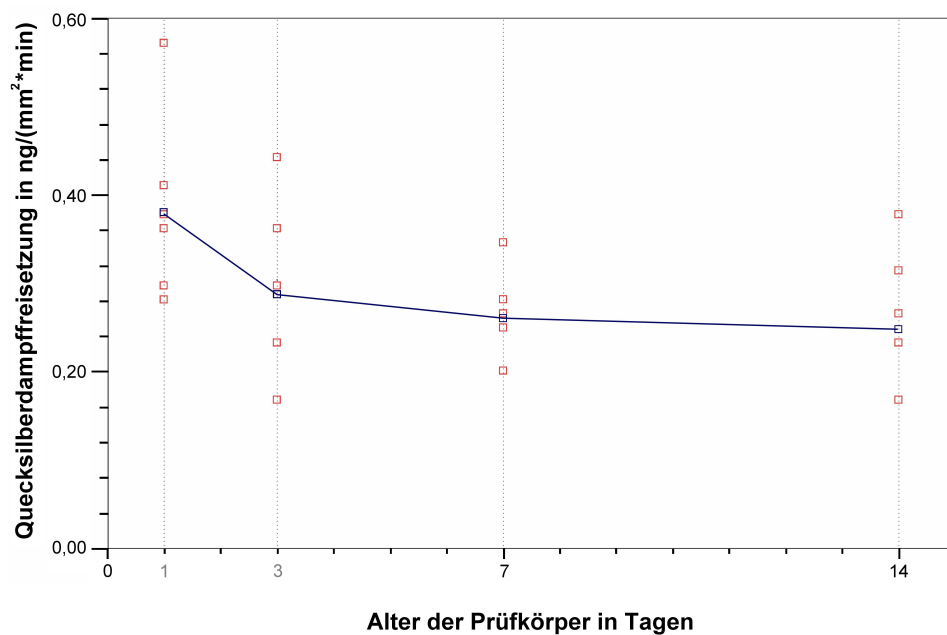


Abb. 18: Streudiagramm mit Darstellung der Quecksilberdampffreisetzung in Abhängigkeit vom Alter der Prüfkörper (rot) und des Regressionsgraphen (blau).

Die beste mathematische Beschreibung des Zusammenhanges zwischen dem Messzeitpunkt und der Dampffreisetzung war durch

$$y = 0,2544 \frac{\text{ng}}{\text{mm}^2 \cdot \text{min}} + 0,2467 \cdot e^{(-0,6538 \frac{1}{h} \cdot t)}$$

gegeben, wobei y der zu erwartende Wert, und t das Alter des Prüfkörpers in Tagen darstellt. Das Bestimmtheitsmaß betrug 0,26, der Korrelationskoeffizient 0,5.

5.2.5 Entwicklung der Quecksilberdampfwerte nach Versuchsende

Tabelle 15: Einzelwerte und Perzentile der Quecksilberdampfmessung in ng/(min·mm²).

Zeitpunkt	Einzelmesswerte des Quecksilberdampfes in ng/(min·mm ²)					Perzentile		
	1	2	3	4	5	25	50	75
0 min	1,088	1,473	1,473	0,100	1,032	1,032	1,088	1,473
5 min	1,393	1,415	1,369	1,658	1,458	1,393	1,415	1,458
15 min	1,850	1,690	1,581	1,449	1,643	1,581	1,643	1,690
30 min	1,513	1,610	1,545	1,353	1,505	1,505	1,513	1,545
45 min	1,449	1,529	1,320	1,529	1,457	1,449	1,457	1,529
60 min	1,224	1,321	1,320	1,433	1,325	1,320	1,321	1,325
90 min	1,239	0,790	0,839	1,418	1,072	0,839	1,072	1,239
120 min	1,128			1,433	1,128	1,128	1,128	1,280

Die Menge der frei gesetzten Quecksilberdämpfe über den trockenen Füllungen lag in diesem Versuch für alle Zeitpunkte um das Vierfache über den Messwerten der anderen Versuche. Die Mediane der Messwerte lagen zwischen 1,072 ng/(min·mm²) (90 Minuten) und 1,643 ng/(min·mm²) (15 Minuten). Nach dem Putzen stiegen die Quecksilberdampfwerte stark an. So lag der Median vor dem Versuch bei 1,088 ng/(min·mm²), um auf einen Wert von 1,643 ng/(min·mm²) nach 15 Minuten anzusteigen. Der höchste gemessene Quecksilberdampfwert trat somit nicht bereits unmittelbar nach dem Putzen auf (5 Minuten – 1,415 ng/(min·mm²)), sondern erst mit einer Verzögerung nach 15 Minuten (siehe Tabelle 15). Nach Erreichen dieses Spitzenwertes fiel die Quecksilberdampffreisetzung wieder ab, jedoch nicht in der Geschwindigkeit, mit der der Anstieg erfolgte. Die Ausgangswerte von 1,088 ng/(min·mm²) wurden nach 90 Minuten mit 1,072 ng/(min·mm²) wieder erreicht (siehe Abbildung 19). Für den Zeitpunkt von 120 Minuten nach dem Putzversuch konnten nur drei Messwerte ermittelt werden, der Vergleich mit anderen Messwerten kann nur bedingt erfolgen.

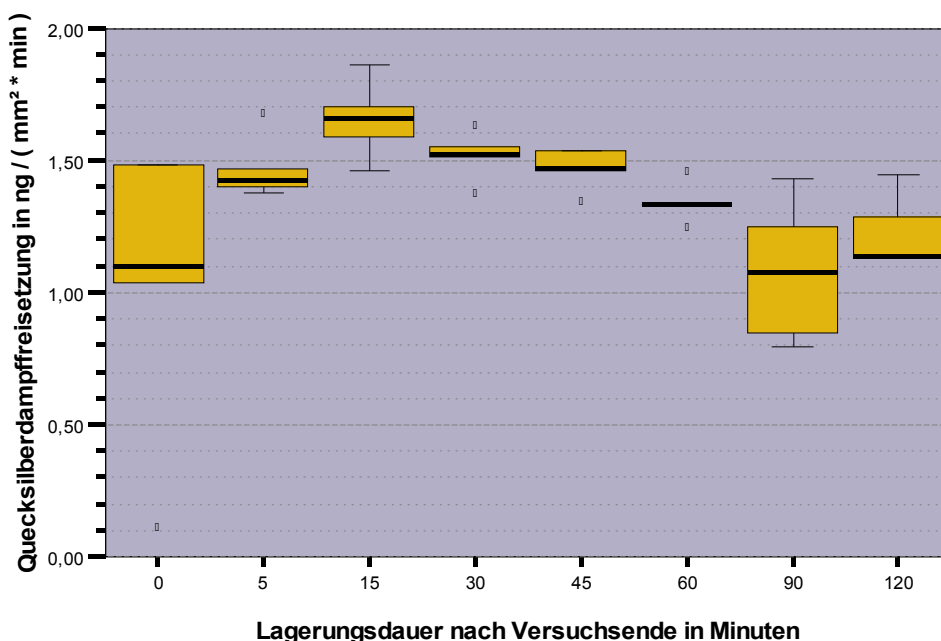


Abb. 19: Verlauf der Quecksilberdampffreisetzung über der trockenen Füllung in Abhängigkeit von der nach Putzende verstrichenen Zeit. Die Zeitachse ist nicht linear geteilt.

Es fanden sich zwischen zeitlich direkt benachbart erhobenen Werten keine signifikanten Differenzen. Die Spitzenwerte nach 15 Minuten unterschieden sich jedoch signifikant von den vor Versuchsbeginn erhobenen Werten ($p < 0,05$) sowie hochsignifikant von den Werten nach 60 und 90 Minuten ($p < 0,01$).

Um eine näherungsweise mathematische Beschreibung der Beobachtung zu ermöglichen, wurden die Daten im Streudiagramm dargestellt, und einer Regressionsanalyse unterzogen.

Die mathematische Beschreibung des zeitlichen Verlaufs war möglich. Der blau gezeichnete Graph der Abbildung 20 entspricht dem Term:

$$y = 1,10 \frac{\text{ng}}{\text{mm}^2 \cdot \text{min}} + \frac{(2,16 \cdot t)}{(20,78 + t)} \cdot e^{-0,035 \cdot t}$$

Wobei y den zu erwartenden Messwert in $\text{ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ und t den Messzeitpunkt in Minuten darstellt. Das Bestimmtheitsmaß $B = r^2$ beträgt 0,576, der Korrelationskoeffizient $r = 0,759$.

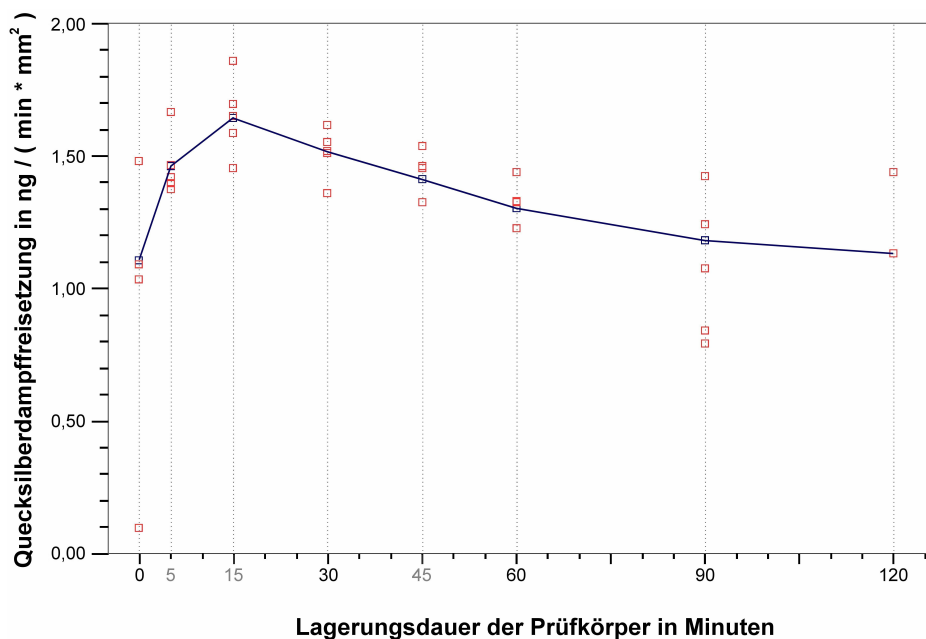


Abb. 20: Verlauf der Quecksilberdampf abgabe in Abhängigkeit von der Zeitspanne nach Beendigung des Putzversuches. Beobachtete Einzelwerte sind rot dargestellt, der Graph der Regression blau. Die Zeitachse ist linear geteilt, die Abszisse ist in ng Hg je Minute und Quadratmillimeter Füllungsfläche geteilt.

6 Diskussion

6.1 Erhebung der Messwerte

In diesem Versuch wurden während des Vorganges des simulierten Zähneputzens zwei unterschiedliche Medien in der Hinsicht auf die Quecksilberkonzentration untersucht. Die Messungen wurden für beide Medien gleichermaßen mit Hilfe der flammenlosen Atom-Absorptions-Spektrometrie durchgeführt. Die Sammlung der Quecksilbermengen erfolgte jedoch auf unterschiedliche Weise.

6.1.1 Messwerte der Putzflüssigkeiten

Die Putzflüssigkeit enthielt das während des Putzvorganges freigesetzte Quecksilber. Nach dem Versuchsende wurde sie mittels einer Pipette gewonnen und der Messung zugeführt. Dabei war es nicht möglich, die gesamte Flüssigkeit aufzunehmen. Auf Grund des relativ hohen Mischungsverhältnisses von einem Milliliter Zahnpasta auf vier Milliliter aqua dest. war die Viskosität der Flüssigkeit erhöht, es verblieben geringe Anteile an den Kammerunterteilen sowie

in höherem Maße an den Borsten der Zahnbürste haften. Im Zuge der Auswertung wurde angenommen, dass Quecksilberatome sowie -ionen in der gesamten Putzflüssigkeit gleichmäßig verteilt waren (Marek 1997) und auf Grund der kurzen Versuchsdauer sowie der geringen eingesetzten Menge Flüssigkeit keine Sedimentierung von Amalgampartikeln stattfand. Die ermittelten Quecksilberkonzentrationen wurden daher ohne Korrekturen verwendet.

Eine weitere Fehlerquelle war die bekannte Adhäsion von Quecksilber an Kunststoffoberflächen (Lussi 1993). Um diese so gering wie möglich zu halten, waren die mit der Flüssigkeit in Kontakt geratenen Flächen der Kammerunterteile geometrisch einfach, so klein wie möglich und glatt gestaltet worden. Auf Grund der Annahme, dass diese Adhäsion keinen Einfluss auf die Relationen der Messwerte untereinander bei den verschiedenen Versuchen hatten, wurden diese Quecksilbermengen nicht berücksichtigt.

Nach Ablauf der Putzbewegungen enthielt die Putzflüssigkeit Quecksilber in unterschiedlichen Verbindungen und Eigenschaften. Atomares Quecksilber Hg^0 lag ebenso wie ionisiertes Quecksilber Hg^{++} aus Korrosionsprodukten neben partikulär gebundenem Quecksilber aus Füllungsabrieb vor. Diese Formen des Quecksilbers werden vom Körper in unterschiedlichem Maße aufgenommen und müssen daher getrennt gewertet werden. Es lagen jedoch in diesem Versuch keine Informationen über die Mengenanteile der jeweiligen Formen vor. Erler fand eine Abnahme der Messwerte von 90% nach Zentrifugation der Putzflüssigkeit, und führte dies auf die sedimentierten partikulären Quecksilberverbindungen zurück (Erler 2001).

Um den Vergleich zu anderen Studien zu ermöglichen, wurden alle Messwerte auf die Füllungsoberfläche bezogen, so dass sie die Quecksilberfreisetzung in Nanogramm je Quadratmillimeter angaben.

6.1.2 Messwerte aus der Absaugung

Die simultan während des Versuchsablaufes abgesaugte Luft enthielt ausschließlich atomares Quecksilber Hg^0 . Durch die Einleitung in schwefelsaure Kaliumpermanganatlösung wurden die Quecksilberatome zu ionisiertem Hg^{++} oxidiert. Da dieses nicht in die gasförmige Phase übergeht, konnte es in der Lösung fixiert werden.

Wie bei den Messwerten aus den Putzflüssigkeiten musste auch für die Quecksilberdampfabgabe das Problem der Adhäsion der Quecksilberatome an Kunststoffoberflächen berücksichtigt werden. Innerhalb der Kammer kann diese auf Grund des stetigen Luftflusses vernachlässigt werden, in den engen PVC-Schläuchen kam es jedoch zu intensiven Kontakten der quecksilberhaltigen Luft und dem Kunststoff. Um die Auswirkungen der Adhäsion so gering wie möglich zu halten, wurden kurze Schläuche verwendet. Eine Messung des adhären

Quecksilbers erfolgte nicht. Lussi et al. gab eine Anlagerung des Quecksilbers an die Kunststoffwände in der Größenordnung von zusätzlich 50% an (Lussi et al. 1993). Die in dieser Arbeit gemessenen Werte sind daher geringer als die tatsächlich freigesetzte Menge Quecksilberdampf.

Um den Vergleich mit anderen Studien zu ermöglichen, erfolgte die Berechnung der Freisetzungsrates in Nanogramm je Minute unter Berücksichtigung der Versuchsdauer von 50 Sekunden (Mackert 1987).

6.2 Zusammenhang der Messwerte aus Absaugung und Putzflüssigkeit.

Für in Flüssigkeiten gelöste gasförmige Stoffe besteht ein physikalischer Zusammenhang zwischen der Konzentration in der Flüssigkeit und der Umgebungsluft, so auch für Quecksilber (Olsson et al. 1989). Da der Vorgang des Zähneputzens nur eine kurze Zeitspanne von drei Minuten in Anspruch nimmt, und die Zahnbürste die Flüssigkeit fortwährend durchstreicht und durchmischt, sollte in diesem Versuch durch Gegenüberstellung der Messwerte geklärt werden, ob eine Beziehung zwischen dem Quecksilbergehalt der Putzlösung und der Quecksilberkonzentration der Abluft besteht (Abbildung 21).

Der so gefundene Zusammenhang lässt sich durch den mathematischen Ausdruck

$$y = 1,17 \cdot x - 6,18 \frac{\text{ng}}{\text{mm}^2 \cdot \text{min}}$$

beschreiben, wobei y die zu erwartende Quecksilberdampffreisetzung in $\text{ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ und x die gemessene Quecksilberfreisetzung in die Putzflüssigkeit in ng/mm^2 darstellen.

Der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient beträgt dabei 0,510, der Zusammenhang zwischen der Quecksilberkonzentration im Putzmedium und der Entwicklung von Quecksilberdämpfen ist somit hoch signifikant ($p < 0,01$).

Das Bestimmtheitsmaß ist mit $B = r^2 = 0,29$ gering, das heißt, lediglich 30% der Streuung der Quecksilberdampfwerte lassen sich auf die Quecksilberkonzentrationen im Putzmedium zurückführen.

Eine mögliche Ursache für diese Streuung kann der kurze Zeitraum des Zähneputzens sein, der nicht ausreichte, um ein Gleichgewicht zwischen gelöstem und gasförmigem Quecksilber Hg^0 einzustellen. Die Komplexität der Prozesse der Freisetzung, Lösung sowie Abdampfung von Quecksilber kann für die Schwankungen verantwortlich sein (Marek 1990). Auch kann eine unvermeidbare geringe Schaumbildung an der Oberfläche sowie die andauernde Bewegung der Borsten in der Flüssigkeit für die starken Abweichungen der Quecksilberdampffreisetzung vom

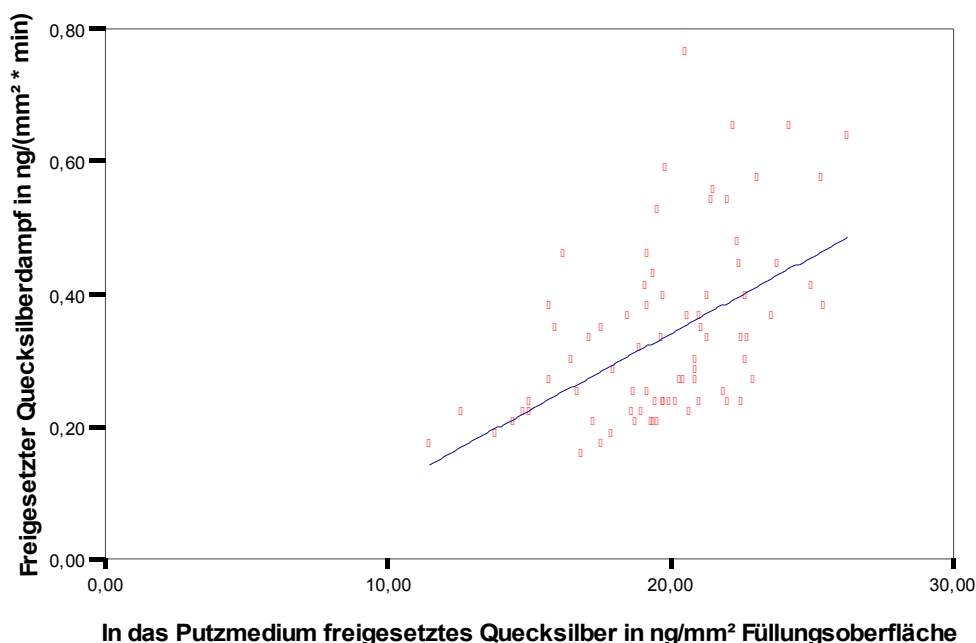


Abb. 21: Quecksilberdampffreisetzung während des Putzens in Abhängigkeit von der Quecksilberfreisetzung in das Putzmedium für alle Versuche. Blau gezeichnet ist die Regressionsgerade.

erwarteten Wert verantwortlich sein. Da des Weiteren lediglich das atomare Hg^0 in die gasförmige Phase übergehen kann, kann auch ein Schwanken dessen Anteils am Gesamtquecksilber im Putzmedium die Schwäche des Zusammenhangs verursachen. Die Absorption von gasförmigem

Quecksilber an Kunststoffoberflächen kann eine Verringerung der Messwerte zur Folge haben, auf Grund der gleichbleibenden Größe und Quecksilberfreiheit der Oberflächen kann sie jedoch nicht für die Schwankungen der Messwerte verantwortlich gemacht werden.

Speichel beeinflusst den Transport von Quecksilber (Berglund 1990). Enzyme, die in den Speichel abgegeben wurden, sind in der Lage, atomares Quecksilber Hg^0 zu zweiwertigem Quecksilber Hg^{++} zu oxidieren, und dadurch den Dampfdruck des Quecksilbers zu reduzieren. Des Weiteren zeigt Quecksilber eine Affinität zu Proteinen, je nach Gehalt des Speichels an Protein kann so durch Bindung an die Speichelproteine das Abdampfen geringer Mengen Hg^0 verhindert werden. So kommt es zur deutlich geringeren Quecksilberdampffreisetzung, wenn Wasser im Putzmedium durch Speichel ersetzt wird. Da jedoch im Hinblick auf den Enzym-, Protein- und Elektrolytgehalt der Speichel starken inter- sowie intraindividuellen Schwankungen unterliegt, ist dessen Einfluss auf die Quecksilberfreisetzung schwer einzuschätzen. Der Protein-

und Enzymgehalt ist stark abhängig von der Einzelperson sowie vom Grad der parasympatischen Anregung der Speicheldrüsen zum Beispiel bei Hunger oder Stress. Daher wurde in diesem Versuch auf die Verwendung von Speichel als Grundlage der Putzflüssigkeit verzichtet.

Die Schwäche des Zusammenhanges des dampfförmigen Quecksilbers und des Quecksilbergehaltes im Putzmedium wird in dieser Arbeit an mehreren Stellen deutlich. Es fanden sich sowohl im Versuch zum verwendeten Amalgam (siehe 5.2.2) als auch im Versuch zur Stopfmethode (siehe 5.2.3) unterschiedliche Relationen zwischen den untersuchten Parametern, wenn die Messwerte aus der abgesaugten Luft und den Putzmedien gemeinsam betrachtet wurden.

Andere Autoren wie Berglund, Schiele und Erler fanden eine geringe Korrelation zwischen Quecksilbergehalt im Speichel und dem Quecksilberdampf (Berglund 1990, Schiele 1999, Erler 2001). Eine toxikologische Bewertung des Quecksilbers aus Amalgamfüllungen oder gar die Diagnose der Quecksilberintoxikation durch Amalgamfüllungen kann daher nicht allein auf Grund der Messwerte aus Speichelproben erfolgen.

6.3 Einfluss der Legierung auf die Quecksilberfreisetzung

Die Herstellung einer Amalgamfüllung ist in praxi vielen Einflüssen ausgesetzt. So hat der behandelnde Arzt die Auswahlmöglichkeit aus einer Vielzahl unterschiedlicher Amalgame. Mehrere Hersteller vertreiben Amalgame unterschiedlicher Zusammensetzung. Die Materialien zeigen bei der Füllungslegung feine Unterschiede, so differieren z. B. die Verarbeitungszeit, der notwendige Stopfdruck oder die Formbarkeit und Schnitzbarkeit der okklusalen Fläche. Vor der Einstellung der Produktion von konventionellem Amalgam und Kupferamalgam konnten auch chemisch stärker differierende Amalgame in die Kavitäten eingebracht werden. Daher stellte sich in dieser Arbeit die Frage, in welchem Ausmaß die Verwendung unterschiedlicher Amalgame die Quecksilberfreisetzung in die Putzflüssigkeit und in die umgebende Luft beeinflusst.

Es wurden vier Legierungen zum Legen der in dieser Arbeit geprüften Füllungen verwendet. Amalcap Plus® ist ein modernes sphärisches Non-Gamma-2-Amalgam, das heißt, die Abbinde-reaktion vollzieht sich unter Rückbildung der korrosionsanfälligen γ -Phase Sn_8Hg unter Bildung der η -Phase Cu_6Sn_5 . Es zeichnet sich weiterhin durch eine hohe Vickershärte aus.

Ein weiteres modernes Gamma-2-freies Amalgam ist das Contour® der Firma *Kerr Corp.* Die Legierung besteht aus 30% gefeilten und 70% sphärischen Partikeln. Es bindet ebenso wie das Amalcap Plus® unter Unterdrückung der γ -Phase ab, zeigt jedoch eine geringe Abbindekontraktion und eine geringere Härte.

Das Amalgam Duragam® ist ebenso ein Gamma-2-freies Amalgam, wurde jedoch nicht vordosiert vertrieben. Die Dosierung und Anmischung mit Quecksilber wurde in diesem Versuch

mittels einer Goldwaage nach Vorschrift des Herstellers vorgenommen. Das vierte in dieser Studie verwendete Dentargam® ist ein Gamma-2-haltiges Amalgam. Es wurde ebenso wie das Duragam® nicht vordosiert vertrieben, die Legierung bestand jedoch aus sehr grob gefeilten Partikeln mit Größen bis zu einem Millimeter. Das vom Hersteller geforderte Anmischverhältnis von vier Masseteilen Quecksilber auf fünf Masseteilen Pulver ergab ein sehr feuchtes Amalgam. Die Rückbildung der Gamma-2-Phase unterblieb beim Dentargam® auf Grund des geringen Kupfergehaltes. Es repräsentiert daher ein konventionelles Amalgam.

Die Unterschiede zwischen den Amalgamen beeinflussten das Messergebnis nicht im erwarteten Maße. Betrachtet man die Messwerte der Putzflüssigkeiten, so fällt auf, dass die Werte der modernen Amalgame nicht niedriger sind als die des konventionellen Amalgams Dentargam®. Lediglich das Amalgam Contour® zeigt eine geringere Quecksilberabgabe, die Mediane der anderen Gamma-2-freien Amalgame liegen im Bereich des konventionellen Amalgams. Die verringerte Quecksilberfreisetzung des Amalgams Contour lässt sich nicht auf das Fehlen der γ_2 -Phase zurückführen. Vergleicht man die Messwerte der Putzflüssigkeit mit denen der Absaugung, zeigte das Amalgam Contour® eine Quecksilberdampffreisetzung, die im Bereich der des Amalgams Amalcap Plus® lag. Nimmt man an, dass die Quecksilberdampfentwicklung vom Anteil der Quecksilberatome Hg^0 im Putzmedium abhängt, kann man folgern, dass der geringere Messwert im Putzmedium des Amalgams „Contour“ durch den in Ionenform vorliegenden Anteil verursacht ist. Dieser spielt jedoch auf Grund der geringen intestinalen Aufnahme und der Tatsache, dass die Putzflüssigkeit in der Regel ausgespuckt wird, eine toxikologisch untergeordnete Rolle (Schiele et al. 1999, Schiele et al. 1996). Die Empfehlung des Amalgams Contour® aus toxikologischer Sicht kann nicht auf Grund der beobachteten geringen Werte in der Flüssigkeit erfolgen. Auffallend hoch waren die Quecksilberdampfwerte des Amalgams Duragam® bei normalen Werten in der Flüssigkeit. Dieses Non-Gamma-2-Amalgam wurde vor der Trituration mit einer Goldwaage dosiert. Die vergleichsweise hohe Dampfentwicklung lässt den Schluss zu, dass in diesen Füllungen ein hoher Anteil ungebundenen Quecksilbers verblieb, das als Hg^0 schlecht wasserlöslich ist und nach der Freisetzung abdampfte. Mitchell und Hay fanden die Abhängigkeit der Menge freigesetzten Quecksilbers von dem Quecksilberanteil bei der Trituration (Mitchell und Hay 1987). Während der Durchführung dentaler Prozeduren stellten Engle et al. eine Abhängigkeit der Freisetzung von Quecksilber vom frei verfügbaren Hg-Anteil in der Struktur des Amalgams fest (Engle et al. 1992). Im Gegensatz dazu zeigte jedoch das konventionelle Amalgam Dentargam® die geringste Freisetzung von Quecksilberdampf, obwohl es nach der Trituration das feuchteste Amalgam ergab. Dies lässt sich auf drei mögliche Ursachen zurückführen:

1. Das feuchte Anmischverhältnis kam durch die großen Partikel und die daher geringe Benetzung der Partikeloberflächen mit Quecksilber zustande. Einerseits wurde ein großer Anteil des Quecksilbers während der Kondensation ausgepresst, andererseits diffundierte das verbleibende Quecksilber in die Partikel und reagierte dort.
2. Die erhöhte Korrosionsanfälligkeit der γ_2 -Phase spielte während der kurzen Belastung durch das Putzen eine untergeordnete Rolle. Im Vordergrund steht hier der Abrieb und die Quecksilberfreisetzung nach mechanischer Belastung, dessen Auswirkung überdeckt die der schwachen Gamma-2-Phase.
3. Im Laufe der Alterung von konventionellen Amalgamen gleichen diese sich im Hinblick auf die Quecksilberfreisetzung an die modernen Amalgam an (Berdousses et al. 1995).
4. Durch die Politur kommt es zur Reduktion des Anteils der Gamma-2-Phase auf der Oberfläche und zur Ausbildung einer kupferhaltigen Phase (Weiland et al. 1988b), der Einfluss der γ_2 -Phase wird gesenkt.

Edelmann fand eine deutlich erhöhte Quecksilberfreisetzung für das konventionelle „Dentargam[®]“ beim Putzversuch 24 Stunden nach Füllungslegung (Edelmann 2002). Derand fand nach dem Stopfen höhere Quecksilberfreisetzungsraten, er sah eine möglicherweise langsamere Oberflächenstabilisierung bei gamma-2-haltigen Amalgamen dafür verantwortlich (Derand 1989). Berdousses et al. fanden keinen klinisch signifikanten Unterschied der Quecksilberabgabe nach 30 Tagen Alterung der Füllung zwischen konventionellen und hochkupferhaltigen Amalgamen (Berdousses et al. 1995). Dieser Effekt kann dafür verantwortlich sein, dass in diesem Versuch nach 14 Tagen Alterung der Füllungen keine Unterschiede der Quecksilberfreisetzungen messbar waren. Auch Mitchell und Hay stellten keine Unterschiede zwischen den Amalgamen nach dem Reiben auf der Füllung fest (Mitchell und Hay 1987). Eine Ursache dafür ist der Umstand, dass bei konventionellen Amalgamen die Korrosion der Gamma-2-Phase nicht zwangsläufig zu einer erhöhten Quecksilberfreisetzung führt (Jørgensen 1977). Vielmehr kommt es während der Abgabe von Zinnionen zur Wiederaufnahme des dabei freigesetzten Quecksilbers und zu dessen Bindung an unverbrauchte Gammaphase.

Die Messwerte dieser Arbeit lassen nicht den Schluss zu, dass ältere Füllungen aus konventionellen Amalgamen zu höheren Quecksilberbelastungen der Patienten führten. Die Indikation zur Entfernung einer alten Amalgamfüllung kann nur auf Grund klinisch feststellbarer Anzeichen wie mangelnde Randqualität, Abrasion, Infraktion oder Korrosionsschäden erfolgen. Die individuelle Testung des Quecksilbergehaltes des Speichels kann keine zusätzlichen Informationen liefern, da die Speichelwerte interindividuell zu stark schwanken und da die

gastrointestinale Aufnahme des gesamten Quecksilbers im Speichel zu gering ist (WHO 1991, Clarkson 1997). Hohe Messwerte bis zu $1200 \mu\text{g/l}$ nach mechanischer Belastung können auftreten, besitzen jedoch auf Grund der geringen Speichelmenge keine toxikologische Relevanz (Schiele et al. 1999).

6.4 Einfluss des Stopfvorganges auf die Quecksilberfreisetzung

Die Qualität von Amalgamfüllungen ist von der Verarbeitungsweise abhängig. So beeinflussen Wasserzutritt, verwendetes Instrumentarium, der Stopfdruck, die Unterfüllung und die Formgebung entscheidend die physikalischen Eigenschaften, die physiologische Eingliederung in den Kauapparat sowie die Lebensdauer der Füllung. Viele dieser Einflussgrößen können vor und während der Füllungslegung suffizient ausgeschaltet werden. Beschränkten Einfluss hat der behandelnde Arzt jedoch bei der Wahl des Kondensationsdruckes. In der Literatur geforderte Stopfdrücke von 20 N/mm^2 sind in der Praxis unpraktikabel (Schmalz und Thonemann 1999), die notwendige Kraft am dünnen Schaft der Instrumente ist nicht über einen längeren Zeitraum aufzubringen. Die Lage der Kavität und die Lagerung des Kiefers des Patienten erschweren oft die Applikation der geforderten Kraft. Des Weiteren ist die Einschätzung der aufgebrachten Kraft schlecht möglich.

In diesem Versuch wurde ein Gewicht unter Berücksichtigung der Hebelarme auf einer Wippe angebracht, so dass die beim Stopfen der Amalgamfüllung aufgebrachte Kraft durch leichtes Abheben der Wippe kontrolliert werden konnte. Bei dem gemessenen Durchmesser des Instrumentenendes von $1,6 \text{ mm}$ war zur Erzeugung des Druckes 20 N/mm^2 eine Kraft von 32 N notwendig. Diese entspricht einer Belastung des Instrumentes mit ca. $3,2 \text{ kg}$! Das Stopfen gestaltete sich durch die schmale Ausführung des Instrumentengriffes anstrengend, die Fertigung von drei Prüfkörpern war nicht direkt nacheinander möglich. Die so angefertigten Prüfkörper sollten die bestmöglichen Amalgamfüllungen repräsentieren. Zur Kontrolle wurden neben den sechs Prüfkörpern mit 20 N/mm^2 weitere sechs Prüfkörper hergestellt, bei denen ein Stopfdruck von 2 N/mm^2 aufgebracht wurde. Dieser Stopfdruck wird von Schmalz und Thonemann als praxisüblich angeführt. Der Kraftaufwand ist hier mit 320 g erheblich geringer, tatsächlich reichte dieser Druck während des Stopfens nicht, um das „Schneesuh-Phänomen“, d.h., das Knirschen des Amalgams und die Bildung einer glänzenden Oberfläche zu erreichen (Schmalz und Thonemann 1999). Die für die in diesem Versuch „handfest“ gestopften Füllungen aufgebrachte Kraft lag zwischen den beiden oben genannten. Dieser Druck führte zum vernehmbaren Knirschen des Amalgams sowie zur Ausbildung einer glänzenden quecksilberreichen obersten Schicht.

In diesem Versuch konnte kein Einfluss der Stopfdrücke auf die Quecksilberfreisetzung gefunden werden. Die Messwerte der handfest gestopften Proben lagen geringfügig oberhalb der Messwerte der mit 20 bzw. 2 N/mm² gestopften Prüfkörper. Eine Reihung nach dem Stopfdruck war nicht möglich. Paradoxerweise fanden sich für die mit dem höchsten Druck gestopften Füllungen die höchsten Quecksilberdampfabgaben. Setzt man voraus, dass ein höherer Stopfdruck zu einer geringeren Porosität und einem geringerem Anteil von unverbrauchtem Quecksilber führt, wären geringere Messwerte zu erwarten gewesen. Ein Grund für die fehlenden Unterschiede zwischen den Messwerten in diesem Versuch kann die erfolgte Politur sein. Die Porosität kann durch die Glättung der Oberfläche ausgeglichen werden, da die Quecksilberabgabe maßgeblich von den Oberflächeneigenschaften der Füllung abhängt. Stachniss beobachtete die Verdichtung der oberflächlichen Schicht der Füllung durch die Politur (Stachniss 1989). Des Weiteren führt die Politur zur Härtesteigerung (Venz und Dermann 1984), was den Effekt des geringeren Kondensationsdruckes herabsetzt. Weiterhin wurde die Führung des Stopfinstrumentes bei der Herstellung der Füllungen mit 20 N/mm² durch den hohen Kraftaufwand erschwert. Geringe Lageungenauigkeiten des Arbeitsendes können so zu leichten Unregelmäßigkeiten der Struktur des Amalgams geführt haben. Von einer Abhängigkeit der Quecksilberabgabe vom Stopfdruck kann auf Grund der vorliegenden Messwerte nicht ausgegangen werden, die Unterschiede waren sehr gering und weit von signifikanten Niveaus entfernt, ein objektivierbarer Unterschied zwischen den Quecksilberabgaben für die unterschiedlichen Stopfdrücke konnte nicht gefunden werden. Dies deckt sich mit der Beobachtung der Autoren Wiemann et al., die keinen Zusammenhang zwischen der Korrosionsanfälligkeit und dem Stopfdruck fanden (Wiemann et al.). Meyer et al. fanden dem gegenüber eine Verringerung der Korrosion durch die Anwendung eines hohen Stopfdruckes (Meyer et al. 1989). Da jedoch die bei der Putzabrasion frei werdenden Mengen Quecksilber durch die mechanische Stimulation stark erhöht werden, und der Vorgang im Vergleich zu Korrosionsversuchen einen sehr geringen Zeitraum in Anspruch nimmt, kann der Effekt der Korrosion hier vernachlässigt werden.

Das in diesem Versuch beobachtete Fehlen der Abhängigkeit der Quecksilberfreisetzung vom Stopfdruck sollte jedoch nicht dazu verleiten, geringe Stopfdrücke zur Herstellung von Amalgamfüllungen als ausreichend zu erachten. Die Verbesserung der physikalischen Eigenschaften des Amalgames und damit die Überlebensdauer der Füllung und der Therapieerfolg hängen vom Stopfdruck ab (Jørgensen 1977, Gainsford 1983), es sollte daher immer nach Kräften kondensiert werden.

Zur optimalen Erzeugung und Applikation des Stopfdruckes wird von den Autoren Jørgensen und Gainsford die Verwendung von Instrumenten mit planem Arbeitsende empfohlen (Jørgensen 1977, Gainsford 1983). Sie ermöglicht das gleichmäßige Zusammenpressen der Amalgamportion

unter dem Instrument ohne das Risiko des Eindringens des Instrumentes unter Verdrängung und Dekondensation bereits kondensierter Amalgammassen. Es stellte sich daher in dieser Arbeit die Frage nach dem Einfluss der Form des Instrumentes auf die Quecksilberfreisetzung der Amalgamfüllung. Es wurden dazu sechs Prüfkörper unter Verwendung eines Stopfers mit kugelförmigen Arbeitsende mit dem Durchmesser 1,8 mm verwendet. Diese Größe wurde gewählt, da kleinere Instrumente bei handfester Stopfung tief in die bereits kondensierte Amalgamportion eindrang, größere Instrumente würden jedoch in praxi nicht alle Bereiche der Kavität erreichen. Die so erzeugte Oberfläche war unregelmäßig, in zentralen und damit randfernen Bereichen musste der Stopfdruck reduziert werden, um das Eindringen des Instrumentes in das Amalgam zu vermeiden. Die Messwerte des Quecksilbergehaltes unterschieden sich nicht von denen mit planem Instrument gestopften Prüfkörpern. Es kam jedoch zu einer erhöhten Freisetzung von Quecksilberdämpfen während der Putzversuche, was auf eine anteilmäßig starke Freisetzung von atomarem Quecksilber Hg^0 schließen lässt. Grund dafür ist möglicherweise der Umstand, dass durch die mangelhafte Stopfung durch das kugelförmige Arbeitsende weniger Quecksilber ausgepresst und mit dem Füllungsüberschuss entfernt wurde und somit der Anteil freien Quecksilbers im Gefüge der Füllung erhöht ist. Es sollte daher auf die Verwendung von Instrumenten ohne planem Arbeitsende verzichtet werden, um die Quecksilberdampffreisetzung und damit diese toxikologisch relevante Hg-Quelle weitest möglich zu reduzieren.

6.5 Einfluss der Nachbearbeitung

Die Nachbearbeitung spielte eine entscheidende Rolle für die Qualität der Amalgamfüllung. Durch das Schnitzen kommt es zur endgültigen Formgebung sowie zur Entfernung der oberen Schicht der Amalgamfüllung, die durch die Kondensation einen erhöhten Quecksilberanteil aufweist (Jørgensen 1977, Helbig 1953,). Die so erhaltene Oberfläche weist eine hohe Rauigkeit auf. Diese fördert die Anlagerung von Biofilmen durch Schaffung von Retentionen und führt zu einer Vergrößerung der mit dem Speichel und der Atemluft in Kontakt stehenden Oberfläche. Dies ermöglicht eine vermehrte Abgabe von Quecksilberatomen über die große Oberfläche, Mackert (Marek 1990) fand eine Abhängigkeit der Quecksilberabgabe vom Verhältnis von Oberfläche und Volumen der Füllung. Porositäten, die insgesamt 0% bis 30% des Volumens der Füllung ausmachen können, öffnen sich auf der Oberfläche und kommunizieren so mit der oralen Umgebung. Dadurch vergrößert sich die Angriffsfläche für die Korrosion des Amalgams, es entstehen dicht benachbarte Regionen mit unterschiedlichen Sauerstoffpartialdrücken (Jørgensen 1977). Die Glättung und Verdichtung der Füllungsoberflächen muss daher fester Bestandteil der Füllungstherapie sein. Der Ablauf der Politur spielt im Hinblick auf die spätere

Korrosionsanfälligkeit und Quecksilberabgabe eine untergeordnete Rolle (Weiland et al. 1988a,b, Stachniss 1989), so lange sie niedertourig, mit leichtem Druck intermittierend und unter Wasserberieselung durchgeführt wird. Das Durchführen des Burnishings nach dem Schnitzen der Füllung kann die Rauigkeit der Füllung zwar im Zeitraum vor der Politur verringern, hat jedoch keinen Einfluss auf das endgültige Ergebnis der Politur (Weiland et al. 1988b). Die Verwendung eines kreuzverzahnten feinen Finierers empfiehlt sich, um kleine Überschüsse zu entfernen und eine grobe Glättung zu erreichen, abschließend kann mit Poliergummis, Bürstchen mit und ohne Politurpaste die Hochglanzpolitur vorgenommen werden (Weiland et al. 1988b). Das Überhitzen der bearbeiteten Fläche muss dabei vermieden werden, da die Struktur des Amalgams bei Temperaturen über 65°C empfindlich gestört wird (Gainsford 1983). Durch die lege artis durchgeführte Politur kann die Härte der Oberfläche gegen Eindringen sowie die Biegefestigkeit erhöht werden (Venz und Dermann 1984, Metzler und Metzler 1998). Es kommt zu einer Anreicherung der Kupferphase an der Oberfläche und damit zur Reduktion des Quecksilbergehaltes (Weiland et al. 1988b, Metzler und Metzler 1998), zur Verringerung der Rauigkeit und damit zur Abnahme der Oberfläche (Weiland et al. 1988a,b, Gainsford 1983), die Quecksilberabgabe wird gesenkt (Weiland und Nossek 1991).

In diesem Versuch sinkt die Quecksilberabgabe in die Putzflüssigkeit durch die Hochglanzpolitur signifikant um 17%. Die Quecksilberdampffreisetzung konnte durch die Politur um 48% reduziert werden. Trotz fehlender statistischer Signifikanz auf Grund der weiten Streuung der Messwerte der unpolierten Prüfkörper kann der starke Unterschied der Werte als relevant eingestuft werden. Edelmann beobachtete eine stärkere Abnahme der Quecksilberfreisetzung in das Putzmedium, Weiland et al. fanden eine Abnahme der Korrosionsanfälligkeit und der Quecksilberfreisetzung durch die Politur (Edelmann 2002, Weiland et al. 1988a,b, Weiland und Nossek 1991). Dem gegenüber beobachteten Hellwig et al. die Angleichung der Quecksilberfreisetzung unpolierter und finierter Füllungen nach zwei Tagen (Hellwig et al. 1990). Diese Beobachtung konnte in diesem Versuch nicht gemacht werden. Der Einfluss der Oberflächenbearbeitung war noch nach 14 Tagen Lagerung signifikant. Die Politur der Füllungen muss daher gefordert werden, der Verzicht kann die Quecksilberbelastung des Patienten während des Zähneputzens erheblich steigern.

6.6 Einfluss des Alters der Amalgamfüllungen

Die Quecksilberfreisetzung in die Putzflüssigkeit sowie die Quecksilberdampfentwicklung waren signifikant vom Alter der Füllungen abhängig. Im Verlaufe von 14 Tagen kam es zur Abnahme der Werte um 18 beziehungsweise 30 Prozent des Ausgangswertes. Diese Abnahme erfolgte je-

doch nicht linear in gleichmäßigen Schritten, sondern im überwiegenden Masse innerhalb der ersten drei Tage. So fand sich sowohl bei den Messwerten der Putzmedien als auch der abgesaugten Luft die stärkste Abnahme zwischen dem ersten und dritten Tage nach Füllungslegung. Im Gegensatz dazu blieb die Freisetzung von Quecksilber nach dem siebenten Tag auf dem gleichen Niveau. Der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient r betrug für die Messwerte aus den Putzmedien -0,724, die Messwerte sind mit einer Wahrscheinlichkeit von 99% vom Messzeitpunkt abhängig. Für die Quecksilberdampfmeswerte betrug der Rangkorrelationskoeffizient r jedoch lediglich -0,302, der Zusammenhang der Messwerte und des Alters ist daher nur schwach und nicht signifikant. Jedoch fand sich eine hochsignifikante Abnahme der Quecksilberdampfmeswerte bis zum siebenten Tag nach Füllungslegung. Dieser Widerspruch ist durch den starken Abfall der Messwerte nach drei Tagen und den dann folgenden konstanten Verlauf sowie die Streuung der Werte erklärbar. Mayer und Diehl fanden die stärkste Abnahme der Quecksilberfreisetzung innerhalb der ersten zehn Tage, während der größte Anteil der Reduktion bereits nach drei Tagen abgeschlossen war (Mayer und Diehl 1976). Berglund beobachtete die stärkste Senkung des Dampfdruckes bereits sechs bis 24 Stunden nach Füllungslegung (Berglund 1993). Derand sah die Abnahme der Quecksilberfreisetzung bereits nach drei Tagen als abgeschlossen an (Derand 1989). Verantwortlich für diesen Prozess ist die Passivierung durch Oxidierung der Oberfläche.

Es fiel in diesem Versuch auf, dass die Verringerung der Messwerte für die abgesaugte Luft stärker und schneller ablief, als die der Putzflüssigkeiten. Dies lässt auf eine überproportionale Abnahme des Anteils der Quecksilberatome am gesamten freigesetzten Quecksilber schließen. Auch fand diese Reduktion statt, obwohl im Rahmen des Versuches die Oberfläche durch die Putzkörper abradert, und die Passivierungsschicht zumindest teilweise entfernt wurde. Eine mögliche Ursache dafür kann die noch nach 24 Stunden anhaltende Bindung restlicher freier Mengen Quecksilbers im Gefüge der Füllung sein. Dadurch sinkt der Anteil des frei in der Füllung vorliegenden Quecksilbers, was durch einen geringeren Dampfdruck zu einer schwächeren Quecksilberdampffreisetzung führt (Berdousses et al. 1995). Die Entwicklung der Quecksilberkonzentration in der Putzflüssigkeit blieb davon weitgehend unbeeinflusst, da atomares Quecksilber Hg^0 schwer wasserlöslich ist (Schweinsberg 1991). Die dennoch erfolgende leichte Abnahme der Messwerte kann auf die innerhalb der ersten zehn Tage erfolgenden Härtesteigerung zurückgeführt werden. Dadurch setzt das Material den Putzkörpern einen höheren Widerstand beim Eindringen in die Oberfläche entgegen und verringert den mechanischen Abrieb sowie den Einfluss der mechanischen Belastung und damit die Freisetzung von Quecksilber in die Flüssigkeit. Berdousses et al. fanden keine Abnahme der Quecksilberfreisetzung bis zum siebenten Tag nach Füllungslegung, bis zum 15. Tag nahm die Freisetzung jedoch um die Hälfte

ab (Berdousses et al. 1995). Dies wurde auf Oxidation und mikrostrukturelle Änderungen zurückgeführt.

Die Entwicklung der Messwerte sowie die nichtlineare Regression der Quecksilbermesswerte im Putzmedium lassen einen Verlauf erkennen, der dem natürlichen Zerfall nach Euler entspricht. Die Werte nähern sich dabei jedoch nicht der Nachweisgrenze von 0,1 ng/ml, das heißt, dem Ende der Quecksilberfreisetzung, sondern einem konstantem Wert nach sieben Tagen. Lussi und Schoenberg fanden jedoch eine Abnahme der Quecksilberfreisetzung auf 5 - 8 Prozent der Ausgangswerte nach zwei Jahren (Lussi und Schoenberg 1991). Legt man die beobachtete Abnahme der Messwerte von 30% in dieser Arbeit zugrunde, muss eine schwache Abnahme noch nach dem vierzehnten Tage vermutet werden, es fehlen bei Lussi und Schoenberg jedoch Angaben über den zeitlichen Verlauf. Konsens herrscht über die Aussage, dass sich die Quecksilberfreisetzung auch bei alten Füllungen nachweisen lässt, ohne zum Erliegen zu kommen. Nicht bestätigt werden konnte jedoch die Aussage von Daunderer, dass die Quecksilberabgabe mit dem Alter der Füllung ansteigt (Daunderer 1992). Weder die Messungen dieser Arbeit noch die Beobachtungen anderer Autoren ließen einen solchen Schluss zu.

6.7 Quecksilberdampffreisetzung nach Versuchsende

Durch mechanische Irritation wie Druck und Abrieb beim Kauen und beim Zähneputzen kommt es zur Erhöhung der Quecksilberabgabe. Da jedoch während der Nahrungsaufnahme sowie während des Zähneputzens die Mundatmung erschwert oder unmöglich ist, fällt die toxikologische Relevanz nicht den unmittelbar bei der Belastung entstehenden Quecksilberkonzentrationen zu, sondern den nach Ende der Irritation auftretenden Quecksilberdämpfen. Um den Vergleich der Messwerte nach dem Putzversuch mit den Ruhewerten zu ermöglichen, wurden vor Versuchsbeginn (0 Minuten) Quecksilberdampfmessungen vorgenommen. Die Freisetzung von Quecksilberdämpfen ist durch die im Speichel stattfindenden sehr komplexen Vorgänge wie Diffusion, Oxidation und Proteinbindung starken Schwankungen ausgesetzt. Da jedoch in diesem Versuch auf Grund des hohen maschinellen Aufwandes nur wenige Messwerte erzielt werden konnten, mussten die Einflussmöglichkeiten eingeschränkt werden. Auch war nicht gesichert, in wie weit Amalgamfüllungen während der Mundatmung von einem Speichelfilm überdeckt werden. Daher fanden die Messungen mit trockenen, unbedeckten Prüfkörpern statt. So konnten die stark schwankenden Einflüsse auf die Quecksilberabdampfung durch Speichel ausgeschaltet werden. Durch die Messung über trockenen Amalgamfüllung wurden also Werte für den ungünstigsten Fall ermittelt.

Die so erzielten Messwerte lagen um den Faktor vier über den Messwerten der anderen Versuche

und übertreffen damit die in vivo zu erwartenden Werte (Knappwost et al. 1985, Marek 1990). Derand gab eine Reduktion der Werte auf 30% an, wenn die Füllungen mit Wasser bedeckt waren (Derand 1989). Dies stimmt mit der Beobachtung in dieser Arbeit überein, so liegen die Dampfmeswerte während der Überdeckung mit Putzflüssigkeit während des Putzens im Durchschnitt mit $0,33 \text{ ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ bei 25% des Durchschnitts der trocken gemessenen Werte von $1,35 \text{ ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$. Dieser Vergleich ist jedoch nur eingeschränkt möglich.

Der zeitliche Verlauf zeigte nach Beendigung des Versuches einen Anstieg auf 151% des Ruhewertes. Der höchste Messwert trat jedoch nicht sofort auf, sondern fand sich 15 Minuten nach Ende der Putzbewegungen. Nach Erreichen dieses Wertes sank die Quecksilberfreisetzung innerhalb von 75 Minuten wieder auf den Ausgangswert, um auch nach insgesamt 120 Minuten auf einem unveränderten Niveau zu verbleiben. Insgesamt lag der Ruhewert um 37% niedriger als der Spitzenwert nach 15 Minuten. Sällsten et al., Lorscheider et al. und Ott et al. fanden bei Versuchspersonen nach dem Kaugummikauen die maximalen Quecksilberdampfmeswerte erst nach Ablauf von zehn Minuten (Sällsten et al. 1995, Lorscheider et al. 1995, Ott et al. 1986). Auch hier waren die Werte nach 90 Minuten ebenso hoch wie vor dem Kauen des Kaugummis. Vimy und Lorscheider beobachteten 60 Minuten nach der Stimulation durch zehnminütiges Kaugummikauen eine Abnahme der Quecksilberdampffreisetzung auf 17% des Ausgangswertes (Vimy und Lorscheider 1985). Die zeitlichen Verläufe der Messwerte dieser Studien sind mit dem dieser Arbeit vergleichbar, es ist daher anzunehmen, dass sowohl beim Zähneputzen, als auch durch die Stimulation durch Kaugummi ähnliche Prozesse in der Amalgamfüllung angeregt werden. So fanden auch Patterson et al. eine Stunde nach dem Zähneputzen eine Reduktion der Messwerte auf 33% des Ausgangswerts (Patterson et al. 1985).

Die beste mathematische Beschreibung war durch die Verknüpfung zweier Funktionen durch Substitution möglich. Dabei beschreibt die Funktion

$$y = \frac{(2,16 \frac{\text{ng}}{\text{mm}^2 \cdot \text{min}} \cdot t)}{(20,78 \text{ min} + t)}$$

den Anstieg der Quecksilberfreisetzung durch die Stimulation durch das Zähneputzen (roter Graph in Abb. 22), wobei t die abgelaufene Zeitspanne in Minuten und y der zu erwartende Messwert darstellen. Sie würde sich unbeeinflusst dem Wert $3,24 \text{ ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ nähern. Durch Einsetzen der Neubildung einer Oxidschicht auf der Oberfläche der Amalgamfüllung und möglicherweise durch gleichzeitige Wiederherstellung der ursprünglichen Binnenstrukturen des Materials kam es jedoch zur gleichzeitigen Abnahme der Quecksilberfreisetzung. Dies wird nach

$$y = N \cdot e^{-0,035 \frac{1}{\text{min}} \cdot t}$$

Euler durch die Funktion beschrieben (gelber Graph in Abb. 22), wobei N der Ausgangswert vor

Beginn der Abnahme der Quecksilberfreisetzung darstellt. Dieser Wert N ist jedoch nicht konstant, sondern wird durch den oben beschriebenen Anstieg bestimmt.

Durch Einsetzen des Termes für den Anstieg (s.o.) in die Funktion nach Euler erhielt man den Term

$$y = \frac{(2,16 \frac{ng}{mm^2 \cdot min} \cdot t)}{(20,78 min + t)} \cdot e^{-0,035 \frac{1}{min} \cdot t}$$

sowie nach Einfügen der Konstante $1,10 \text{ ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ als Ruhewert der Quecksilberfreisetzung vor der Stimulation die Formel:

$$y = 1,10 \frac{ng}{mm^2 \cdot min} + \frac{(2,16 \frac{ng}{mm^2 \cdot min} \cdot t)}{(20,78 min + t)} \cdot e^{-0,035 \frac{1}{min} \cdot t}$$

(blauer Graph in Abb. 22). Dabei ist t der Zeitpunkt der Messung nach dem Ende der Putzbewegung in Minuten und y der zu erwartende Messwert in $\text{ng}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min})$.

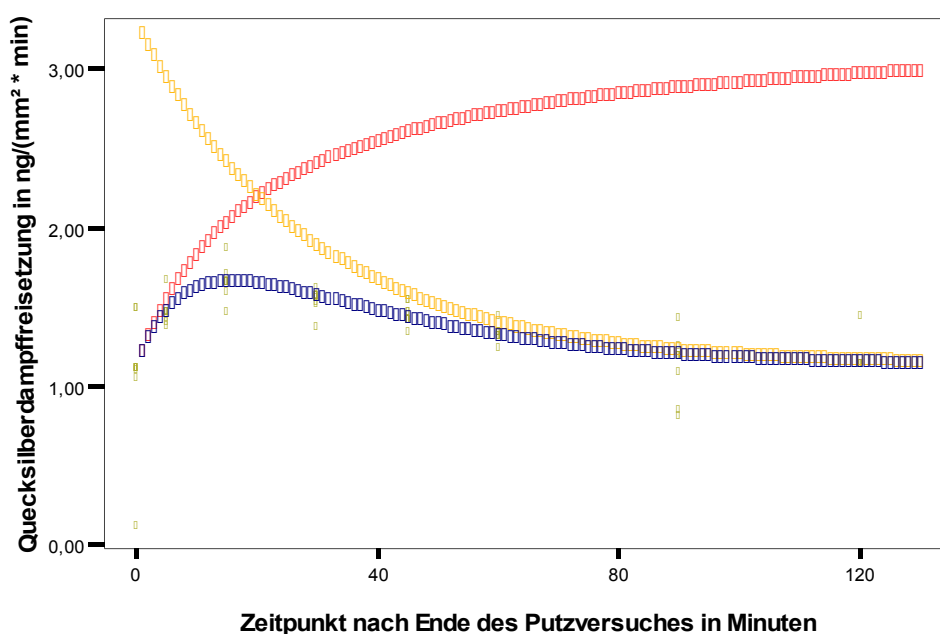


Abb. 22: Darstellung der zur Regression für die Messwerte der Quecksilberdampffreisetzung nach der Stimulation der Amalgamprüfkörper in Abhängigkeit von der Zeit verwendeten Funktionen. Die grünen Punkte markieren die gemessenen Werte. Der rote Graph stellt die Funktion des Anstiegs der Dampfwerte durch die mechanische Stimulation dar. Gelb gezeichnet ist die Funktion für die durch Passivierung verursachte Abnahme der Quecksilberfreisetzung. Durch Substitution entsteht eine Funktion, dargestellt durch den blauen Graphen, die das gleichzeitige Ablaufen beider Prozesse zeigt. Diese ist die beste mathematische Beschreibung für den Verlauf der Messwerte.

Das Bestimmtheitsmaß betrug dabei 0,58, das heißt, 58% der Schwankung der Werte waren durch den Messzeitpunkt bestimmt. Es ist damit jedoch nicht hoch genug, um den Zusammenhang der Messwerte vom Zeitpunkt der Messung auf statistisch signifikantem Niveau anzunehmen.

6.8 Kalkulation der Mehrbelastung durch das Zähneputzen

Alle in dieser Studie erhobenen Messwerte wurden für eine plane Amalgamfüllung mit einer Oberfläche von $50,3 \text{ mm}^2$ während der einmaligen Putzabrasion ermittelt. Dies entspricht nach Mayer und Gantner und Mayer et al. einer dreiflächigen Füllung eines zweiten Prämolaren oder einer zweiflächigen Molarenfüllung (Mayer und Gantner 1989, Mayer et al. 1995). Weiland und Nossek errechneten daraus eine Gesamtfüllungsfläche von 10 cm^2 (Weiland und Nossek 1991). Da jedoch die approximalen Anteile der Füllungen nicht von den Borsten der Zahnbürste erreichbar sind, liegt die durch die Zahnbürste stimulierbare Füllungsoberfläche unterhalb dieses Betrages. Mayer et al. gibt für die freie Füllungsfläche bei Füllung aller Sechsjahrmolaren mit dreiflächigen und aller Fünfer mit zweiflächigen Füllungen mit 380 mm^2 an (Mayer et al. 1995). Derand gibt für 12 okklusale Füllungen eine Oberfläche von zirka 100 mm^2 an (Derand 1989). Die Putzbewegungen wurden innerhalb von 50 Sekunden durchgeführt, diese Zeitspanne entspricht etwa einem Viertel von 3 Minuten, also der Zeitspanne, innerhalb derer ein Quadrant von der Bürste überstrichen wird. Der größte Anteil der 380 mm^2 erreichbarer Füllungsoberfläche (Mayer und Gantner 1989) wird jedoch nur beim Putzen der Okklusalfäche der Kauleiste überstrichen. Da innerhalb der 50 Sekunden jedoch auch die vestibulären und lingualen Flächen, welche seltener Füllungsausläufer enthalten, gereinigt werden, ist die reelle Dauer der mechanischen Belastung der Füllungen geringer. Edelmann fand einen direkten Zusammenhang zwischen der Borstenstrichzahl und damit der Dauer des Putzvorganges und der freigesetzten Quecksilbermenge, die hier gemessenen Werte sind daher etwas überhöht (Edelmann 2002). Mit den Messwerten der Quecksilberfreisetzung in das Putzmedium sowie in die Abluft ließ sich die Quecksilberfreisetzung während des Zähneputzens in einer Woche berechnen und mit den von anderen Autoren gefundenen Werten sowie der von der WHO angegebenen akzeptablen wöchentlichen Quecksilberzufuhr vergleichen.

Für die Belastung mit Quecksilber aus dem Putzspeichel gilt:

$$\text{freigesetztes Hg} \cdot \text{Anzahl Zähneputzen} \cdot \text{Gesamtoberfläche} = \text{wöchentlich freigesetztes Hg}$$

Bei einer durchschnittlichen Quecksilberfreisetzung in die Putzflüssigkeit von $19,7 \text{ ng/mm}^2$ und einer von der Zahnbürste erreichbaren Amalgamfläche von 380 mm^2 errechnet sich für die einmalige Zahnreinigung :

$$19,7 \text{ ng Hg/mm}^2 \cdot 380 \text{ mm}^2 = 7,5 \text{ } \mu\text{g Hg}.$$

Schiele fand bei Versuchspersonen hohe Quecksilbermengen von bis zu $1200 \text{ } \mu\text{g/l}$ im Putzspeichel, im Vergleich liegt der Wert in dieser Studie beim einmaligen Zähneputzen bei $3800 \text{ } \mu\text{g/l}$ (Schiele 1999). Da genaue Angaben über die Menge Putzspeichel bei den Versuchspersonen fehlen, ist ein Vergleich schwierig, er lässt jedoch darauf schließen, dass die in dieser Arbeit erzielten Werte gegenüber den in vivo zu erwartenden Werten erhöht sind.

Da die Putzflüssigkeit sofort nach Ende des Zähneputzens ausgespuckt und der Mund ausgespült wird, kann davon ausgegangen werden, dass das während dieser Zeit in den Speichel freigesetzte Quecksilber fast vollständig eliminiert wird. Geht man von dem ungünstigen Fall aus, dass eine Person 10% des Putzmittels verschluckt, so ingestiert sie im Verlaufe einer Woche bei zweimal täglichem Zähneputzen

$$7,5 \text{ } \mu\text{g Hg} \cdot 0,1 \cdot 14 = 10,4 \text{ } \mu\text{g Hg}.$$

Die Aufnahme von Quecksilber über den Gastrointestinaltrakt ist jedoch eingeschränkt. Atomares Quecksilber Hg^0 wird auf Grund der geringen Wasserlöslichkeit nicht aufgenommen, die Resorptionsrate liegt unter einem Prozent. Abgeschilferte Partikel zeigen während der Passage des Magen-Darm-Traktes keinen Masseverlust, eine Aufnahme von Quecksilber ist daher aus dieser Quelle nicht möglich (Wirz 1991). Ionisiertes Quecksilber kann in geringen Maßen vom Darm resorbiert werden, die Aufnahme liegt bei zirka 10% (WHO 1991, Wirz 1991). Da die Mengenverhältnisse zwischen den Zustandsformen des Quecksilbers in der Putzflüssigkeit nicht bekannt waren, musste für den ungünstigsten Fall davon ausgegangen werden, dass 100% des gelösten Hg in ionisierter Form vorlagen. Dann ergab sich eine intestinale Aufnahme innerhalb einer Woche durch das Verschlucken von Putzspeichel:

$$10,4 \text{ } \mu\text{g} \cdot 0,1 = \mathbf{1,04 \text{ } \mu\text{g}}$$

Bei Zugrundelegung der höchsten in dieser Arbeit aufgetretenen Quecksilberkonzentration im Putzmedium betrug dieser Wert $1,4 \text{ } \mu\text{g Hg}$ je Woche.

Auf Grund der Tatsache, dass der größte Teil des Quecksilbers partikulär gebunden ist (Schiele et al. 1999) und somit nicht resorbiert wird, ist der Wert von $1,04 \text{ } \mu\text{g}$ weit überzogen. Zusätzliche Aufnahmewege über die Mundschleimhaut (Patterson et al. 1985, Willershausen-Zönnchen et al. 1992, Hahn et al. 1989) sowie eine eventuell stattfindende Methylierung von Quecksilber (Halbach et al. 1997) können daher bei Zugrundelegung dieses Wertes vernachlässigt werden.

Quecksilberdampf wird von der Lunge auf Grund der starken Lipophilie von atomarem Hg nahezu vollständig aufgenommen, eine Resorptionsquote von 80% gilt in der Literatur als erwiesen

(Schiele 1998, WHO 1991). Daher spielt die Quecksilberdampffreisetzung eine weitaus größere Rolle bei der Einschätzung der Quecksilberbelastung durch Amalgamfüllungen. In dieser Arbeit kam es während der Versuche zu einer Quecksilberdampffreisetzung von durchschnittlich $0,33 \text{ ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$, das entspricht während einer Putzdauer von 3 Minuten (Riethe 1974) und bei einer erreichbaren Füllungsoberfläche von 380 mm^2 einer Quecksilberdampffreisetzung von 381 ng Hg^0 oder $1 \text{ ng}/\text{mm}^2$ Füllungsoberfläche. Im Verlaufe einer Woche würden so $5,3 \text{ } \mu\text{g}$ gasförmigen Quecksilbers entstehen. Die Aufnahme des im Mund entstehenden Quecksilberdampfes hängt jedoch vom Ausmaß der Mundatmung ab. Für den Zeitraum der Mundpflege sind jedoch keine Angaben bekannt, es wurde hier die ununterbrochene Mundatmung angenommen. Ferner wird lediglich die Menge Quecksilber aufgenommen, die bei der Inspiration entsteht, daher wird nur 50% des Quecksilbers aufgenommen.

Mit 80% Resorption in der Lunge (Schiele 1998, WHO 1991) kommt es dabei zu einer wöchentlichen Aufnahme von

$$5,3 \text{ } \mu\text{g} \cdot 80\% \cdot 50\% = \mathbf{2,1 \text{ } \mu\text{g}}.$$

Die höchste Quecksilberdampfentwicklung in dieser Arbeit führt im Verlaufe einer Woche zu einer Aufnahme von $4,9 \text{ } \mu\text{g}$ durch die tägliche Zahnpflege. Während des Zähneputzens entstehender Schaum und die stattfindenden Manipulationen erschweren jedoch die Mundatmung oder machen sie unmöglich. Die errechneten $2,1 \text{ } \mu\text{g}$ stellen daher die eher seltene Ausnahme dar, die tatsächlich aufgenommene Menge Quecksilber sollte weit darunter liegen.

Zwei Stunden nach Beendigung der Mundhygiene waren erhöhte Quecksilberdampfwerte messbar. Da in diesem Zeitraum die Mundatmung nicht gestört ist, kommt ihm die größte Rolle bei der Berechnung der Quecksilberbelastung durch die Zahnpflege zu. Der Betrag der so aufgenommenen Quecksilberdämpfe entspricht der Fläche unter dem Regressionsgraphen (siehe Abb. 23). Die Berechnung erfolgt über das Integral des durch Regression (siehe 6.7) ermittelten mathematischen Termes (mit $y =$ zu erwartender Messwert in ng Hg nach t Minuten):

$$y = \int_0^{120} \left\{ 1,10 \frac{\text{ng}}{\text{mm}^2 \cdot \text{min}} + \frac{(2,16 \frac{\text{ng}}{\text{mm}^2 \cdot \text{min}} \cdot t)}{(20,78 \text{ min} + t)} \cdot e^{(-0,035 \frac{1}{\text{min}} \cdot t)} \right\} dt$$

Die so ermittelte innerhalb der zwei Stunden nach dem Zähneputzen über der trockenen $50,3 \text{ mm}^2$ großen Füllung freigewordene Quecksilbermenge betrug $8,0 \text{ } \mu\text{g}$. Dabei verursachte die mechanische Irritation eine Freisetzung von $1,4 \text{ } \mu\text{g}$ (rote Fläche in Abb. 23), während durch die Basisfreisetzung unter Ruhe im selben Zeitraum $6,6 \text{ } \mu\text{g Hg}$ frei würden (blaue Fläche in Abb. 23). Der Anteil der Quecksilberfreisetzung nach Belastung an der gesamten Quecksilberdampfentwicklung ist mit 22% sehr gering. Da die Überdeckung der Füllung mit Wasser oder Speichel

die Quecksilberabgabe um 70% senkt (Berglund 1990, Knappwost et al. 1985, Derand 1989), beträgt die zusätzliche Quecksilberdampffreisetzung für die unter Feuchtigkeit stehende Füllung 0,4 μg und die gesamte Quecksilberdampffreisetzung 2,4 μg . Bei einer Füllungsoberfläche von 380 mm^2 steigt die durch Stimulation hervorgerufene Quecksilberfreisetzung (rote Fläche Abb. 23) auf 3,04 μg nach einmaligen Zähneputzen und auf 42,6 μg im Verlaufe einer Woche.

Mash et al. fanden im in-vitro-Versuch nach dem Putzen von Amalgamfüllungen mit Zahnpasta eine Freisetzung von 5,7 ng/mm^2 Füllungsoberfläche innerhalb eines Zeitraumes von 20 Minuten, bei einer Gesamtfläche von 380 mm^2 liegt die durch Stimulation erhöhte Quecksilberfreisetzung mit 2,2 μg etwas unterhalb des Wertes in dieser Studie (Mash et al. 1997).

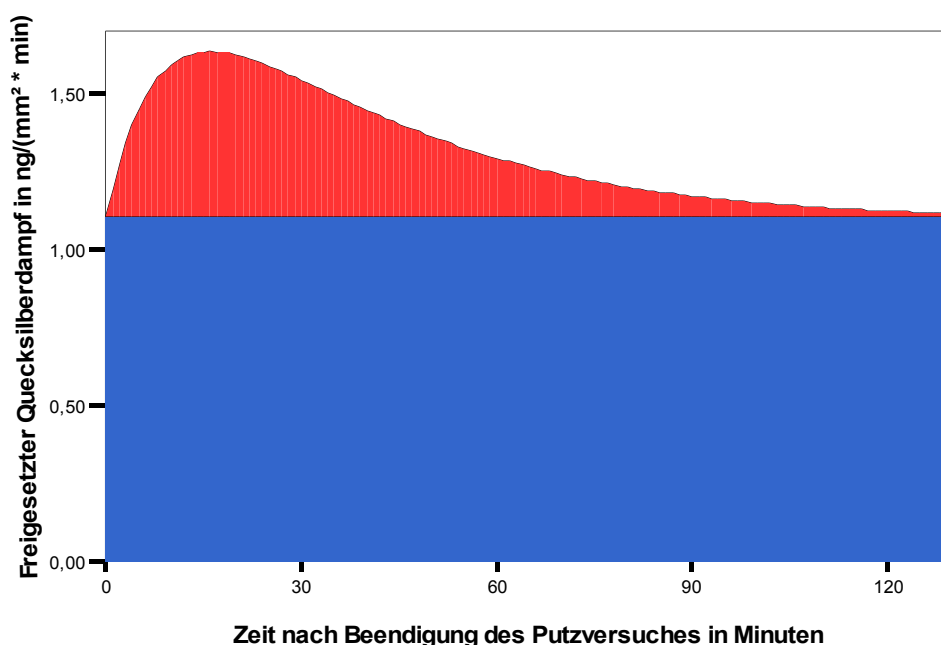


Abb. 23: Darstellung der zusätzlich durch die Mundhygiene hervorgerufenen Quecksilberdampffreisetzung (rote Fläche) und der Quecksilberfreisetzung der ruhenden Füllung (blaue Fläche) im Zeitraum von zwei Stunden nach dem Putzversuch.

Um die aus der Atemluft in diesem Zeitraum resorbierte Menge Quecksilber zu berechnen, muss der Anteil der Inspiration am gesamten Lufttransport (50%), die Resorptionsquote (80%) sowie der Anteil der Mundatmung berücksichtigt werden. Berdousses et al. nutzte zur Berechnung der gesamten Tagesdosis ein Modell, bei dem die unterschiedlichen Anteile der Mundatmung im Verlaufe des zirkadianen Rhythmus berücksichtigt werden (Berdousses et al. 1995). Dabei werden für Ruhephasen 0,4% Mundatmung nach Uddströmer, während der Kommunikation 58% nach Camner und Bakke und für den Schlaf 17% nach Gleeson et al. Mundatmung angenommen

(Uddströmer 1940, Camner und Bakke 1980, Gleeson et al. 1986). Da bei zweimalig täglichem Zähneputzen gewöhnlich morgens vor Beginn der Arbeit und abends vor der Nachtruhe geputzt wird, wurde hier einmal der Wert von Camner und Bakke für die Kommunikation und einmal der Wert für den Schlaf nach Gleeson et al. verwendet.

Damit errechnete sich eine Belastung von

$$\begin{aligned} y_m &= 3,04 \mu\text{g} \cdot 0,5 \cdot 0,8 \cdot 0,58 = 0,71 \mu\text{g} && \text{morgens sowie} \\ y_a &= 3,04 \mu\text{g} \cdot 0,5 \cdot 0,8 \cdot 0,17 = 0,21 \mu\text{g} && \text{abends und damit} \\ y_w &= (0,71 \mu\text{g} + 0,21 \mu\text{g}) \cdot 7 = 6,44 \mu\text{g} && \text{wöchentlich.} \end{aligned}$$

Insgesamt kommt es unter Berücksichtigung aller Aufnahmewege des Quecksilbers nach dem Zähneputzen zu einer zusätzlichen Belastung von:

1,04 $\mu\text{g Hg}^{++}$	aus dem Putzspeichel,
+ 2,12 $\mu\text{g Hg}^0$	als Quecksilberdampf während der Zahnpflege,
+ <u>6,44 $\mu\text{g Hg}^0$</u>	als Quecksilberdampf nach der Zahnpflege,
= 9,60 $\mu\text{g Hg}$	insgesamt innerhalb einer Woche.

Bei Verwendung der höchsten Werte für die Quecksilberfreisetzung während der Versuche errechnete sich eine wöchentliche Quecksilberaufnahme von 15,9 μg durch die Mundhygiene.

6.9 Toxikologische Bewertung der Belastung mit Quecksilber

Die von der WHO angegebene und vom deutschen Bundesgesundheitsamt anerkannte maximale tolerierbare Quecksilberaufnahme im Verlaufe einer Woche (TWI = tolerable weekly intake = tollerierbare wöchentliche Einnahme) beträgt 300 μg Quecksilber (WHO 1991, Schweinsberg 2002). Die durch die Zahnpflege verursachte zusätzliche Quecksilberaufnahme unterschreitet diesen Wert um 87 – 97%. Da der TWI-Wert jedoch sämtliche Quecksilberquellen einbezieht, müssen die zusätzlich durch die Nahrung sowie durch die ruhenden Amalgamfüllungen entstehenden Belastungen berücksichtigt werden. Schiele fand eine wöchentliche Zufuhr von 22 bis 49 $\mu\text{g Hg}$ in Nahrungsmitteln, die in der Literatur angegebenen Aufnahmemengen aus Amalgamfüllungen liegen zwischen 2,1 und 84 μg je Woche (Schiele 1998, Berdousses et al. 1995, Mackert 1987, Skare und Engqvist 1994, Halbach 1995b). Die Summe von maximal 149 $\mu\text{g Hg}$ je Woche liegt bei 50% des TWI, dieser wird von Füllungsträgern nicht erreicht. Die Quecksilberaufnahme, bei der die ersten Symptome sichtbar werden (LOEL = lowest observed effect level = Belastung mit geringsten beobachtbaren Effekten) liegt in einem Bereich des zehn-

fachen Wertes des TWI. Eneström und Hultman fanden erste geringfügige Symptome bei einer Belastung von 7700 bis 11760 µg Quecksilber je Woche (Eneström und Hultman 1995). Auch durch eine exzessive Mundhygiene kann ein Anstieg der Belastung auf diese Werte nicht erfolgen. Die Angaben, die täglich aufgenommene Menge Quecksilber könnten Symptome im Rahmen eines Mikromerkuralismus verursachen (Vimy und Lorscheider 1985, Schiele 1998), konnten bis heute nicht bewiesen werden, und gelten als widerlegt (Mackert 1987, Molin 1992, Ahlqwist et al. 1988). Eine erhöhte Inzidenz von Multipler Sklerose, Morbus Parkinson, Morbus Alzheimer sowie die Existenz der dem Amalgam angelasteten Syndrome CFS (chronic fatigue syndrome, chronisches Müdigkeitssyndrom) und MCS (multiple chemical sensitivity, Multiple Überempfindlichkeit) gelten als widerlegt (Lübbe und Wüthrich 1997, Molin 1992, Schweinsberg et al. 1998). Der Zusammenhang zwischen Amalgam und auftretenden Resistenzen der Oralflora ist nicht ausreichend dokumentiert (Schweinsberg et al. 1998) oder widerlegt (Ekstrand et al. 1998). Eine eventuell gesundheitsschädigende Auswirkung der Zahnreinigung durch den erhöhten Beitrag zur Gesamtbelastung des Körpers mit Quecksilber ist daher in hohem Maße unwahrscheinlich.

6.10 Empfehlung zur Senkung der Belastung durch die Mundhygiene

Der Anteil der durch die Zahnreinigung verursachten Belastung an der Gesamtbelastung des Körpers mit Quecksilber beträgt zwischen 11 und 82%. Die Verringerung der durch diese mechanische Belastung vermehrt freigesetzten Quecksilbermengen kann daher zu einer Entlastung des Körpers führen.

Die Wahl der Legierung hatte keinen Einfluss auf die Quecksilberfreisetzung im Putzversuch. Ein Amalgam, das im Laufe der Liegezeit wenig Quecksilber freisetzt, kann daher nicht empfohlen werden. Die Verarbeitung des Materials spielt jedoch eine entscheidende Rolle. Durch die Verwendung vordosierter Kapseln zum Anmischen des Füllungsmaterials konnte die Quecksilberdampffreisetzung während der Zahnreinigung verringert werden. Auf ein trockenes Anmischverhältnis sollte bei der Trituration geachtet werden, das Auspressen überschüssigen Quecksilbers während des Stopfens kann die Quecksilberdampffreisetzung weiter reduzieren. Die Verwendung von kapsulär vertriebenen Amalgamen empfiehlt sich auch aus praxishygienischen Gründen. So kann die Belastung des Praxispersonals durch ein Umgehen des Hantierens mit flüssigem Quecksilber sowie die während des Anmischvorganges freigesetzten Quecksilbermengen reduziert werden. Das Stopfen soll mit einem planen Stopfer mit geringem Durchmesser des Arbeitsendes durchgeführt werden. Dieses Vorgehen kann die Quecksilberfreisetzung geringfügig jedoch nicht signifikant verringern, das Auftreten von Füllungen mit sehr

hohen Freisetzungsraten kann vermieden werden. Die effektivste Möglichkeit, die Freisetzung von Quecksilber zu verringern, stellt die Politur dar (Weiland et al. 1988a,b, Weiland und Nossek 1991, Metzler und Metzler 1998). Die ästhetische Wirkung sowie die Funktionalität kann hierdurch verbessert werden, vor allem jedoch kann die Quecksilberdampffreisetzung erheblich um bis zu 50% gesenkt werden. Die Politur hat zum Schutz der oberflächlichen Schichten sowie des Patienten und Praxispersonals vor der erheblichen Quecksilberfreisetzung unter Vorsichtsmaßnahmen zu erfolgen. Der Kraftaufwand ist zu minimieren, intermittierendes Arbeiten mit geringen Drehzahlen sowie unter Wasserkühlung kann ein Überhitzen und eine erhebliche Quecksilberabgabe der Füllung vermeiden.

Edelmann fand im in-vitro-Versuch eine Abhängigkeit der Quecksilberfreisetzung vom Abrasionswert der verwendeten Zahnpasta (Edelmann 2002). Erler konnte bei Probanden ebenso eine Abhängigkeit der Freisetzungsraten nach dem Zähneputzen vom RDA-Wert der verwendeten Zahncreme feststellen, der Einfluss war jedoch gering und interindividuell unterschiedlich (Erler 2001). Zur Reduktion der Quecksilberbelastung während und unmittelbar nach der Zahnpflege, aber auch zum Schutz der Zahnhartsubstanz muss die Empfehlung gering abrasiver Zahncremes erfolgen. Die Empfehlung sollte dabei auch zusätzlich Eigenschaften wie Karieshemmung, Förderung der Remineralisierung und Zahnsteininhibition berücksichtigen, da auf Grund des geringen Einflusses der Zahnreinigung sowie der Zahncreme auf die Gesamtbelastung die Vorbeugung von neuen kariösen Läsionen bei der Wahl des Pflegemittels deutlich im Vordergrund stehen sollte. Von der regelmäßigen Nutzung von hochabrasiven Zahncremes, Zahnweissprodukten und Zahnpulvern muss in Hinblick auf die Quecksilberfreisetzung sowie den hohen Hartsubstanzabtrag abgeraten werden. Die zur Zahnreinigung verwendete Zahnbürste spielt eine entscheidende Rolle bei der Quecksilberabgabe während des Zähneputzens (Edelmann 2002), weiche Zahnbürsten verursachen eine signifikant geringere Quecksilberfreisetzung in den Putzspeichel. Riethe fand keine ausreichende Reinigung der Zähne mit einer weichen Bürste, die Zahnreinigung sollte daher mit mittelharten Borsten erfolgen (Riethe 1997).

Die zusätzliche Zufuhr von Selen als Antidot (WHO 1991) sollte nicht erfolgen, da keine günstigen Auswirkungen auf den Effekt des Quecksilbers zu erwarten sind (Kaga et al. 1991) und es die Ausscheidung von Quecksilber verlangsamen kann (Halbach 1991).

Die Zahnreinigung und der Kauvorgang erzeugen gleichermaßen einen Anstieg der Quecksilberdampffreisetzung in einem Zeitraum von 90 Minuten. Die aus Gründen der Prävention erfolgte Empfehlung, die Zahnreinigung unmittelbar nach der Nahrungsaufnahme durchzuführen, kann auch die Quecksilberdampffreisetzung deutlich reduzieren, da der Zeitraum der erhöhten Dampffreisetzung zusammengeführt wird. Die zusätzliche Quecksilberaufnahme durch das Zähneputzen kann somit weitgehend verringert werden.

7 Schlussfolgerung

Die Putzmaschine im in-vitro-Versuch stellt eine geeignete Möglichkeit dar, die Quecksilberfreisetzung aus Amalgamfüllungen unter mechanischer Belastung zu simulieren. Dabei konnten die folgenden Beobachtungen gemacht werden:

- Aus Amalgamfüllungen wurde unter Ruhebedingungen ständig Quecksilber freigesetzt.
- Die Stimulation und Abrasion der Amalgamfüllungen durch Zahnbürsten und Zahnpasta führte zu einer Quecksilberfreisetzung in das Putzmedium und in die Umgebungsluft.
- Es besteht eine Abhängigkeit der Quecksilberdampfentwicklung vom Quecksilbergehalt im Putzmedium.
- Das verwendete Amalgam und die Art der Legierung hatten keinen Einfluss auf die Höhe der Quecksilberabgabe. Es konnten keine Unterschiede bei der Quecksilber- und Quecksilberdampfabgabe zwischen Gamma-2-haltigen und Gamma-2-freien Amalgamen gefunden werden. Es fand sich daher kein Hinweis auf eine höhere Quecksilberbelastung von Patienten mit alten Amalgamfüllungen.
- Die manuelle Dosierung von Pulver und Flüssigkeit führte zur erhöhten Quecksilberdampfentwicklung der Füllung. Das Amalgam Duragam® setzte dabei bis zu $0,2 \text{ ng}/(\text{min} \cdot \text{mm}^2)$ mehr frei, als alle anderen in diesem Versuch verwendeten Amalgame.
- Der Stopfdruck hatte keinen Einfluss auf die Höhe der Quecksilberabgabe aus den Füllungen. Die Quecksilberfreisetzung in das Putzmedium unterschied sich nicht trotz Applikation des zehnfachen Stopfdruckes, die Quecksilberdampfabgabe differierte nur geringfügig.
- Nicht plane Stopfinstrumente führten zu unregelmäßig kondensierten Füllungen und erzeugten Füllungen mit erhöhter und stark variierender Hg-Dampfentwicklung.
- Die Politur ist das wichtigste Mittel zur Senkung der Quecksilberabgabe. Diese kann zur Reduktion des Dampfdruckes um 50% führen.
- Die Alterung der Amalgamfüllungen hatte einen signifikanten Einfluss und führte zur Abnahme der Quecksilberfreisetzung in das Putzmedium um 18% und in die Umgebungsluft um 30%. Die Abnahme der Freisetzungsrates kam nach 7 Tagen zum Erliegen.

- Die mechanische Belastung führte nach deren Abklingen für einen begrenzten Zeitraum zur signifikanten Erhöhung der Quecksilberdampfabgabe. 15 Minuten nach Beendigung der mechanischen Belastung durch die Bürstenköpfe kam es zu einer Erhöhung um 51% des Ruhewertes. Nach weiteren 75 Minuten war die Freisetzungsrates wieder auf den Ausgangswert vor dem Versuchsbeginn zurückgegangen.

Die wöchentliche Aufnahme von durch die Zahnreinigung freigesetztem Quecksilber beträgt 9,6 µg Hg. Sie liegt damit unter Berücksichtigung der anderen Quellen wie Nahrung, Luft, Wasser und die Freisetzung aus Amalgamfüllungen in Ruhe mit 149 µg Hg unterhalb der von der WHO tolerierten Aufnahme von 300 µg Hg (TWI). Die Ausbildung quecksilbertoxischer Symptome ist nicht zu erwarten, selbst bei exzessiver Mundhygiene wird die zur Ausbildung minimaler Symptome notwendige Quecksilberaufnahme nicht erreicht (Schiele 1998, Schweinsberg 2002).

Die Ausbildung amalgamassoziierter Krankheitsbilder wie der Mikromerkuralismus, die Multiple Überempfindlichkeit sowie das chronische Müdigkeitssyndrom unterhalb der Belastungsgrenze des TWI (tolerable weekly intake) sowie der ursächliche Zusammenhang mit Multipler Sklerose, Morbus Alzheimer oder Parkinson gilt als bestenfalls fragwürdig und kann bis heute nicht belegt werden (Halbach et al. 1997, Schiele 1996, Staehle 1992). Die Behauptungen, Amalgam sei gesundheitsschädlich (Wassermann et al. 1997, Mayer et al. 1995, Dauderer 1999), kann derzeit nicht bewiesen werden (Wirz 1991, Lübke und Wüthrich 1997). Amalgam kann nicht als gesundheitsgefährlich beurteilt werden (Metzler und Metzler 1998, Staehle 1992, Wirz 1991, Aberer 1998, Gebhardt et al. 1995). Ein in allen Punkten zufriedenstellender Amalgamersatz kann derzeit nicht angeboten werden (Staehle 1992, Rateitschak 1992, Wirz et al. 1990), der Ersatz sämtlicher Amalgamfüllungen mit der qualitativ besseren Einlagefüllung würde extrem hohe Kosten verursachen (Halbach 1995a, Gebhardt et al. 1995) und ist nicht praktikabel.

Auch im Hinblick auf die zusätzliche Quecksilberfreisetzung durch Stimulation wie zum Beispiel durch die Zahnreinigung liegt kein Grund vor, auf Amalgam zu verzichten (Staehle 1992).

8 Literaturverzeichnis

Aberer W. 1998.

Wie gefährlich ist Amalgam?.

Wien Klin Wochenschr, 110(13-14):455-458.

Ahlqwist M, Bengtsson C, Furunes B, Hollender L, Lapidus L. 1988.

Number of amalgam tooth fillings in relation to subjectively experienced symptoms in a study of swedish women.

Commun dent oral epidemiol, 16:227-231.

Aronsson AM, Lind B, Nylander M, Nordberg M. 1989.

Dental amalgam and mercury.

Biol metals, 2(1):25-30.

Babendererde E, Held M, Unterspann S. 1970.

Untersuchungen zur Diffusion des Quecksilbers aus Silber-Zinn-Amalgam-Füllungen mittels Hg^{203} .

Dtsch Stomat, 20(5):343-348.

Barnarius R, Mieler I, Singert M. 1967.

Untersuchungen über den Reinigungseffekt von Zahnbürsten und Zahnpasten.

Dtsch Stomat, 17 (8):598-606.

Barregard L, Sällsten G, Järholm B. 1995.

People with high mercury uptake from their own amalgam fillings.

Occup environ med, 52:124-128.

Begerow J, Zander D, Freier I, Dunemann L. 1994.

Long-term mercury excretion in urine after removal of dental amalgam fillings.

Int arch occup environ health, 66:209-212.

Berdousses E, Vaidyanathan TK, Dastane A, Weisel C, Houpt M, Shey Z. 1995.

Mercury release from dental amalgams: An in vitro study under controlled chewing and brushing in an artificial mouth.

J dent res, 74:1185-1193.

Berglund A. 1993.

An in vitro and in vivo study of the release of mercury vapor from different types of amalgam alloys.

J dent res, 72(5):939-946.

Berglund A. 1990.

Estimation by a 24-hour study of the daily dose of intra-oral mercury vapor inhaled after release from dental amalgam.

J dent res, 69(10):1646-1651.

Berglund A, Pohl L, Olsson S, Bergman M. 1988.

Determination of the release of intra-oral mercury vapor from amalgam.

J dent res, 67(9):1235-1242.

Björkman L, Lind B. 1992.

Faktors influencing mercury evaporation rate from dental amalgam fillings.

Scand j dent res, 100:354-360.

Bolt HM, Greim H, Marquardt H, Neumann HG, Oesch F, Ohnesorge FK. 1990.

Zur Toxizität von Zahnfüllungen aus Amalgam.

Med Klin, 85(5):350-352.

Boyd ND, Benediktsson H, Vimy MJ, Hooper DE, Lorscheider FL. 1991

Mercury from dental „silver“ tooth fillings impairs sheep kidney function.

Am j physiol, 261(4 Pt 2):R1010-1014.

Cammann K, Hrsg. 2001.

Instrumentelle analytische Chemie: Verfahren, Anwendungen und Qualitätssicherung.

Heidelberg, Berlin: Spektrum, Akademische Verlag GmbH.

Camner P, Bakke B. 1980.

Nose or mouth breathing?.

Environ res, 21:394-398.

Chien YC, Feldman CA, Zohn HK, Weisel CP. 1996.

Urinary mercury levels bevor and after amalgam restoration.

Sci total environ, 188(1):39-47.

Christ M, Riethe P. 1972.

Über die Auswirkungen verschiedener Stopfdrucke und Stopftechniken auf die Druckfestigkeit, den Quecksilbergehalt und die Porosität von Amalgamprüfkörpern.

Dtsch zahnärztl Z, 27:725-732.

Clarkson TW. 1997.

The toxicity of mercury.

Crit rev clin lab sci, 34(4):369-403.

Cox SW, Eley BM. 1987.

Further investigations of the soft tissue reaction to the γ_1 phase (Ag_2Hg_3) of dental amalgam, including measurements of mercury release and redistribution.

Biomater, 8(4):296-300.

Cox SW, Eley BM. 1986.

The release, tissue distribution an excretion of mercury from experimental amalgam tattoos.

Br j exp pathol, 67(6):925-935.

Daunderer, M. 1992.

Handbuch der Amalgam-Vergiftung : Diagnostik, Therapie, Recht.
Landsberg: ecomed.

Daunderer, M. 1999.

Amalgam.
Landsberg: ecomed.

Derand T. 1989.

Mercury vapor from dental amalgams, an in vitro study.
Swed dent j, 13:169-175.

Deutsches Institut für Normung, Hrsg. 1991.

Legierungen für Dentalamalgam.
DIN EN 21559.

Deutsches Institut für Normung, Hrsg. 1991.

Zahnärztliches Quecksilber.
DIN EN 21560.

Drasch G, Scharl K, Roider G, Schiwara H, Zilker T, Steiner M, Schumann M. 1997.

Aussagekraft des DMPS-Test auf Quecksilber.
Umweltmed Forsch Prax, 2(1):2-10.

Drasch G, Schupp I, Höfl H, Reinke R, Roider G. 1994.

Mercury burden of human fetal and infant Tissues.
Eur j pediatr, 153:607-610.

Drasch G, Schupp I, Riedl G, Günther G. 1992.

Einfluss von Amalgamfüllungen auf die Quecksilberkonzentration in
menschlichen Organen.
Dtsch zahnärztl Z, 47:490-496.

Eggleston DW. 1989.

Dental amalgam: A review of the Literature

Compend contin educ dent, 10(9):500-505

Edelmann J. 2002.

Die Freisetzung von Quecksilber durch Putzabrasion von Amalgamfüllungen in vitro [Dissertation].

Jena: Friedrich-Schiller-Universität.

Ekstrand J, Björkman L, Edlund C, Sandborgh-Englund G. 1998.

Toxicological aspects on the release and systemic uptake of mercury from dental amalgam.

Eur j oral sci, 106(2 Pt 2):678-686.

Ely JT, Fudenberg HH, Muirhead RJ, LaMarche MG, Krone CA, Buscher D, Stern EA. 1999.

Urine mercury in Mikromercurialism: Bimodal distribution and diagnostic implications.

Bull environ contam toxicol, 63(5):553-559.

Eneström S, Hultman P. 1995.

Does amalgam affect the immune system? A controversial issue.

Int arch allergy immunol, 106:180-203.

Engle JH, Ferracane JL, Wichmann J, Okabe T. 1992.

Quantitation of total mercury vapor released during dental procedures.

Dent mater, 8(3):176-180.

Engqvist A, Colmsjö A, Skare I. 1998.

Speciation of mercury excreted in feces from individuals with amalgam fillings.

Arch environ health, 53(3):205-213.

Erler MM. 2001.

Humanbiomonitoring zur Quecksilberfreisetzung aus Amalgamfüllungen durch Zahncremeprodukte im quantitativen Vergleich zur Belastung durch Anwendung eines Zahnpflegekaugummis [Dissertation].

Jena: Friedrich-Schiller-Universität.

Eti S, Weisman R, Hoffman R, Reidenberg MM. 1995.

Slight renal effect of mercury from amalgam fillings.

Pharmacol toxicol, 76(1):47-49.

Europäische Normen EN. 1995.

Zahnärztliche Amalgamatoren.

EN ISO 7488.

Ferracane JL, Hanawa T, Okabe T. 1992.

Effectiveness of oxide films in reducing mercury release from Amalgams.

J dent res, 71(5):1151-1155.

Fischer AA. 1997.

Dental mercury amalgam: PartII. Savety of mercury Amalgam.

Cutis, 60(5):231.

Friberg L. 1991.

Inorganic mercury.

Geneua: World Health Organisation.

Gainsford ID. 1983.

Silberamalgam in der zahnärztlichen Praxis.

Stuttgart: Georg-Thieme-Verlag.

Gebel T, Dunkelberg H. 1996.

Einfluß des Kaugummikonsums sowie einer dentalen Nachbarschaft von Amalgamfüllungen zu metallischen Restaurationen anderer Art auf den Quecksilberurgingehalt.

Zbl Hyg, 199:69-75.

Gebhardt M, Welker D, Knopf B. 1995.

Gesundheitliche Risiken von Amalgamfüllungen aus dermatologischer und zahnärztlicher Sicht.

Z Dermatol, 181:6-15.

Gleeson K, Zwillich CW, Braier K, White DP. 1986.

Breathing rout during sleep.

Am rev respir dis, 134:115-120.

Goering PL, Galloway WD, Clarkson TW, Lorscheider FL, Berlin M, Rowland AS. 1992.

Toxicity assesment of mercury vapor from dental amalgams.

Fundam appl toxicol, 19(3):319-329.

Hahn JL, Kloiber R, Vimy MJ, Takahashi V, Lorscheider FL. 1989.

Dental „silver“ tooth fillings: a source of mercury exposure revealed by whole-body image scan and tissue analysis.

Faseb j, 3:2641-2646.

Halbach S. 1995a.

Combined estimation of mercury species released from amalgam.

J dent res, 74(4):1103-1109.

Halbach S. 1995b.

Estimation of mercury dose by a novel of quantitation of elemtal and inorganic species released from amalgam.

Int arch occup environ health, 67(5):295-300.

Halbach S. 1995c.

Toxizität von Amalgam, Stellungnahme zu Leserbrief.

Med Klin, 86(3):171-172.

Halbach S, Hickel R, Meiners H, Ott K, Reichl FX, Siele R, Schmalz G, Staehle HJ. 1997.

Amalgam im Spiegel kritischer Auseinandersetzungen. Interdisziplinäre Stellungnahme zum „Kieler Amalgamgutachten“.

Köln. Bundeszahnärztekammer, Hrsg .

Hanke D. 2002.

Einfluß der Quecksilberfreisetzung aus Amalgamfüllungen auf die Empfindlichkeit ausgewählter Antibiotika gegenüber oralen Streptokokken [Dissertation].

Jena: Friedrich-Schiller-Universität.

Heidemann D, Hrsg. 2001.

Amalgamfreie Füllungstherapie

Alternative Wege

Mit Aufklärungsbroschüre für das Patientengespräch.

München, Jena: Urban-und-Fischer-Verlag.

Helbig K. 1953.

Über das Stopfen des Amalgams.

Dtsch zahnärztl Z, 19(8):1071-1074.

Hellwig E, Stachniss V, Duschner H, Klimek J, Herzogenrath B. 1990.

Quecksilberabgabe aus Silberamalgamfüllungen in vitro.

Dtsch zahnärztl Z, 45(1):17-19.

Hickel R, Klaiber B. 1992a.

Alternativen zum Amalgam.

Dtsch zahnärztl Z, 47(3):144-148.

Hickel R, Klaiber, B. 1992b.

Gibt es Alternativen zum Amalgam?.

Dtsch zahnärztl Z 47(3):134.

Herrmann D. 1992.

In: Amalgam – Pro und Contra

Gutachten – Referate – Statements – Diskussionen.

Institut der deutschen Zahnärzte, Hrsg, 53-54.

Hüstler J, Zimmermann H. 1996.

Statistische Prinzipien für medizinische Projekte.

Bern: Verlag-Hans-Huber.

Jørgensen KD. 1977.

Amalgame in der Zahnheilkunde.

München, Wien: Karl-Hauser-Verlag.

Kaga M, Seale NS, Hanawa T, Ferracane JL, Waite DE, Okabe T. 1991.

Cytotoxicity of amalgams, alloys, and their elements and phases.

Dent mater, 7(1):86-72.

Klaschka F, Matzick R. 1992.

Allergologische Probleme bei mit Amalgamfüllungen versorgten Patienten.

[Vortrag]

In: -Amalgam – Pro und Contra

Gutachten – Referate – Statements – Diskussionen.

Institut der deutschen Zahnärzte (Hrsg); 47 -52.

Klemann D, Weinhold J, Strubelt O, Pentz R, Jungblut JR, Klink F. 1990.

Der Einfluß von Amalgamfüllungen auf die Quecksilberkonzentrationen in Fruchtwasser und Muttermilch.

Dtsch zahnärztl Z, 45(3):142-145:

Knappwost A, Gura E, Fuhrmann D, Enginaley A. 1985.

Abgabe von Quecksilberdampf aus Dentalamalgamen unter Mundbedingungen.
ZWR, 94(2):131-139.

Konsensuspapier. 1997.

Ein Konsensuspapier des Bundesministeriums für Gesundheit, Bundesinstitutes für Arzneimittel und Medizinprodukte, der Bundeszahnärztekammer, Kassenzahnärztlichen Bundesvereinigung, Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung und des Bundes der naturheilkundlich tätigen Zahnärzte Deutschlands.
Eigenverlag; 1-3.

Koshiro K, Inoue S, Tanaka T, Koase K, Fujita M, Hashimoto M, Sano H. 2004.

In Vivo degradation of resin-dentin bonds produced by a self-etch vs. a total etch adhesive system.
Eur j oral sci, 112:368-375.

Kramer F. 1992.

Schäden durch Amalgam - Argumente der Kritiker [Vortrag].
In: -Amalgam – Pro und Contra
Gutachten – Referate – Statements - Diskussionen.
Institut der deutschen Zahnärzte (Hrsg); 66-77.

Lange DE. 1990.

Zahnpasten – Inhaltsstoffe und Wirkungen.
In: Ketterl W, Hrsg.
Dtsch Zahnärztekall 49:77-91.

Larose P. 2001.

Dental amalgam: tradition or evidence based care?.
J can dent assoc, 67(4):190-191.

Lorscheider FL, Vimy MJ, Summers AO. 1995.

Mercury exposure from „silver“ tooth fillings: emerging evidence questions a traditional dental paradigm.

Faseb j, 9:405-408.

Lübbe J, Wüthrich B. 1997.

Amalgamallergie und Amalgamkontroverse.

Thür Zahnärztebl, 12:475-477.

Lukas D. 1992.

Beurteilung des elektrochemischen Verhaltens von Metallen in der Mundhöhle [Vortrag].

In: Amalgam – Pro und Contra

Gutachten – Referate – Statements - Diskussionen.

Institut der deutschen Zahnärzte (Hrsg); 41-43.

Lussi A. 1993.

Die Quecksilberabgabe von Amalgam in die Mundflüssigkeit.

Schweiz Monatsschr Zahnmed, 103(6):722-726.

Lussi A, Schoenberg V. 1991.

Die Quecksilberabgabe verschiedener Amalgame in vitro.

Schweiz Monatsschr Zahnmed, 101(11):1405-1408.

Lutz HJ. 1996.

Vergleichende in vitro-Blindstudie über die

Reinigungseigenschaften dreier Zahnpasten [Dissertation].

Ulm: Universität Ulm.

Maas C, Brück W, Haffner HT, Schweinsberg F. 1996.

Untersuchung zur Bedeutung einer cerebralen Quecksilberbelastung aus Amalgamfüllungen durch direkten Mund- und Nase- Hirn- Transport.

Zbl Hyg , 198:275-291.

Mackert JR. 1987.

Faktors affecting estimation of dental amalgam mercury exposure from measurements of mercury vapor levels in intra-oral and expired air.

J dent res, 66(12):1775-1780.

Mahler DB, Adey JD, Van Eysden J. 1975.

Quantitative microprobe analysis of amalgam.

J dent res, 54:218-226.

Marek M. 1997.

Dissolution of mercury vapor in simulated oral environments.

Dent mater, 13:312-315.

Marek M. 1990.

The release of Mercury from dental amalgam: The Mechanism and in vitro testing.

J dent res, 69(5):1167-1174.

Marxkors R. 1992.

[Vortrag].

In: Amalgam – Pro und Contra

Gutachten – Referate – Statements - Diskussionen.

Institut der deutschen Zahnärzte (Hrsg); 44-46.

Mash LK, Ohmoto K, Nakajima H, Shintani H, Okabe T. 1997.

Mercury evaporation from amalgam after brushing with toothpastes [Abstract].

J dent res, 76:404 Abstract 3122

Mayer R, Aicham P, Stoz F. 1995.

Generelles Amalgam-Verbot bei Frauen im gebärfähigen Alter nicht gerechtfertigt.

Zahnärztl Mitt, 85(4):362-368.

Mayer R, Diehl W. 1976.

Abgabe von Quecksilber aus Amalgamfüllungen in den Speichel.
Dtsch zahnärztl Z, 31:855-859.

Mayer R, Gantner K. 1980.

Oberflächenvermessung von Amalgamfüllungen im Hinblick auf mögliche Quecksilberintoxikation.
Dtsch zahnärztl Z, 35:1073-1074.

Metzler H, Metzler C. 1998.

Amalgam – eine Glaubensfrage?.
Schweiz Monatsschr Zahnmed, 108(8):753-762.

Meyer G, Tews M, Wiesner A, Nägerl H. 1989.

Einflußgrößen auf das Korrosionsverhalten von Amalgamen.
Dtsch zahnärztl Z, 44(7):544-547.

Mitchell RJ, Hay WE. 1987.

Comparison of mercury release by aged amalgams after rubbing [Abstract].
J dent res, 66 Spec Iss: 291 Abstract 1474

Molin C. 1992.

Amalgam - Fact and fiction.
Scand j dent res, 100:66-73.

Müller-Fahlbusch H. 1992.

Psychosomatische Untersuchungen der mit Amalgamfüllungen in Verbindung gebrachten Beschwerden [Vortrag].
In: -Amalgam – Pro und Contra
Gutachten – Referate – Statements - Diskussionen.
Institut der deutschen Zahnärzte (Hrsg).

Olsson S, Berglund A, Pohl L, Bergman M. 1989.

Model of mercury transport from amalgam restorations in the oral cavity.
J dent res, 68(3):504-508.

Ott KHR, Krafft T, Kröncke A, Schaller KH, Valentin H, Weltle D. 1986.

Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf der Quecksilberfreisetzung aus
Amalgamfüllungen nach dem Kauen.
Dtsch zahnärztl Z, 41:968-972.

Patterson JE, Weissberg BG, Dennison PJ. 1985.

Mercury in human breath from dental amalgams.
Bull environ contam toxicol, 34(4):459-468.

Penzer V. 1986.

Amalgam toxicity: Grand deception.
Int j orthod, 24(1-2):21-24.

Piikivi L, Tolonen U. 1989.

EEG findings in chlor-alkali workers subjected to low long term exposure to
mercury vapour.
Br j ind med, 46(6):370-375.

Rateitschak KH. 1992.

Amalgam – der bestuntersuchte Werkstoff der restaurativen Zahnmedizin.
Swiss dent, 13(4):7.

Raue H. 1992.

[Vortrag].
In: Amalgam – Pro und Contra
Gutachten – Referate – Statements - Diskussionen.
Institut der deutschen Zahnärzte (Hrsg); 97-100.

Rieth P. 1974.

Die Quintessenz der Mundhygiene.

Berlin: Die-Quintessenz.

Rieth P. 1980.

Geschichtliche Entwicklung der Amalgame.

Dtsch zahnärztl Z, 35:443-449.

Rieth P. 1992.

Amalgam-Gutachten 1985.

In: Amalgam – Pro und Contra

Gutachten – Referate – Statements – Diskussion.

Institut der deutschen Zahnärzte (Hrsg); 209-281.

Sachs L. 1992.

Angewandte Statistik.

Anwendung statistischer Methoden.

Berlin: Springer-Verlag.

Sällsten G, Thoren J, Barregard L, Schütz A, Skarping G. 1996.

Long-term use of nikotine chewing gum and mercury exposure from dental amalgam fillings.

J dent res, 75(1):594-598.

Sandborgh-Englund G, Nygren AT, Ekstrand J, Elinder CG. 1996.

No evidence of renal toxicity from amalgam fillings.

Am j physiol, 271:R941-R945.

Schiele R. 1998.

Quecksilber.

In: Triebig L, Hrsg.

Neurotoxicologie in der Arbeitsmedizin und Umweltmedizin.

Stuttgart: Gentner-Verlag.

Schiele R. 1992.

[Vortrag].

In: Amalgam – Pro und Contra.

Gutachten – Referate – Statements - Diskussionen.

Institut der deutschen Zahnärzte (Hrsg); 27-33.

Schiele R. 1996.

Quecksilber aus Zahnamalgam – Belastung, Beanspruchung, Vergiftung?.

Skeptiker, 9(6):48-54.

Schiele R, Erler M, Böhmer T. 2000.

Entwicklung von Kindern im ersten Lebensjahr in Abhängigkeit von der Quecksilberexposition durch Amalgamfüllungen ihrer Mütter.

Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed, 35(4):176-179.

Schiele R, Erler M, Dittinger EW. 1999.

Untersuchungen zur Quecksilberbelastung fetaler und frühkindlicher Organe infolge mütterlicher Exposition durch Zahnamalgam.

Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed, 34(11):472-475.

Schiele R, Erler M, Erler MM. 1999.

Die Quecksilberfreisetzung beim Zähneputzen und Kaugummikauen.

Zahnärztl Mitt, 89(20):18.

Schiele R, Erler M, Reich E. 1996.

Speicheltests bringen keine zuverlässigen Aussagen.

Zahnärztl Mitt, 86(8):898-900.

Schiele R, Hilbert M, Schaller KH, Welte D, Valentin H, Kröncke A. 1987.

Quecksilbergehalt der Pulpa von ungefüllten und amalgamgefüllten Zähnen.

Dtsch zahnärztl Z, 42:885-889.

Schmalz G, Thonemann B. 1999.

Die Amalgamfüllung.

In: Heidemann D, Hrsg.

Praxis der Zahnmedizin. Kariologie und Füllungstherapie.

München-Jena: Urban Fischer.

Schneider V. 1977.

Untersuchungen zur Quecksilberabgabe aus Silberamalgam-Füllungen mit Hilfe flammenloser Atomabsorption.

Dtsch zahnärztl Z, 32:475-476.

Schuurs AH. 1999.

Reproductive toxicity of occupational mercury. A review of the literature.

J dent, 27(4):249-256.

Schweinsberg F. 1994.

Risk estimation of mercury intake from different sources.

Toxicol lett, 72(1-3):345-351.

Schweinsberg F. 2002.

Metalle – Quecksilber.

In: Wichmann, Schlipkötter, Fülgraff (Hrsg).

Handbuch der Umweltmedizin – Toxikologie, Epidemiologie, Hygiene, Belastung, Wirkung, Diagnostik, Prophylaxe.

Eco-med, 24. Erg. Lfg. 3/02.

Schweinsberg F, Willenbrock J, Heinzow B. 1998.

Aktuelle umweltmedizinische Bewertung der Quecksilberexposition aus
Amalgamfüllungen und Fischkonsum.

Umweltmed Forsch Prax, 3(2):69-71.

Sellars R, Sellars WA, Taylor RD, Seibert GB. 1986.

Safety of amalgam: Toxicity and allergy.

Tex dent j, 103(7):6-12.

Skare I, Engqvist A. 1994.

Human exposure to mercury and silver released from dental amalgam
restorations.

Arch environ health, 49(5):384-394.

Soh G, Chew CL, Lee AS, Yeoh TS. 1991.

Thermal effect on the dissolution of mercury from two dental amalgams.

J oral rehab, 18(2):179-183.

Stachniss V. 1989.

Die Politur der Amalgam-Füllung.

Dtsch zahnärztl Z, 35:474-478.

Stachle HJ. 1992.

Amalgam und Amalgamalternativen.

Quintessenz, 43(11):1743-1760.

Städtler P. 1991.

Dental amalgam III: toxicity.

Int j clin pharmacol ther toxicol, 29(4):168-171.

Stoian M, Meyer JM. 1980.

Etude ultrastructurale en microscopie electronique a balayage de 15 alliages pour amalgames.

Schweiz Monatsschr Zahnheilk, 90(8):733-747.

Stoz F, Aicham P, Jovanovic S, Steuer W, Mayer R. 1995.

Auswirkungen von in der Schwangerschaft neu gelegten Amalgam-Zahnfüllungen auf die Hg-Konzentration bei Mutter und Kind.

Zentralbl Gynakol, 117(1):45-50.

Summers AO, Wireman J, Vimy MJ, Lorscheider FL, Marshall B, Levy SB, Bennet S, Billard L. 1993.

Mercury released from dental "silver" fillings provokes an increase in mercury- and antibiotic-resistant bacteria in oral and intestinal floras of primates.

Antimicrob agents chemother, 37(4):825-834.

Svare CW. 1984.

Dental amalgam related mercury vapor exposure.

Cda j, 12(10):54-60.

Svare CW, Peterson JW, Reinhardt JW, Boyer DB, Frank CW, Gay DD, Cox RD.

The effect of dental amalgams on mercury levels in expired air.

J dent res, 60(9):1668-1671.

Swartzendruber DE. 1993.

The possible relationship between mercury from dental amalgam and diseases I: Effects within the oral cavity.

Medi hypoth, 41(1):31-34.

Takahashi Y, Kawai T, Kawamura N, Hasegawa J, Kameyama Y. 1986.

Mercury content in tissues of rats given diet containing dental amalgam powder.

Dent mater j, 6(2):178-185.

Till T, Wagner G. 1973a.

Untersuchungen zur Löslichkeit der Bestandteile von Amalgamfüllungen während des Kau- und Trinkaktes I. Teil.

ZWR, 82(19):945-948.

Till T, Wagner G. 1973b.

Untersuchungen zur Löslichkeit der Bestandteile von Amalgamfüllungen während des Kau- und Trinkaktes II. Teil.

ZWR, 82(19):1004-1006.

Tulinius AV. 1995.

Mercury, dental amalgam fillings and intellectual abilities in Inuit school children in Greenland.

Arct med res, 54(2):78-81.

Uddströmer M. 1940.

Nasal respiration. A critical survey of some current physiological and clinical aspects on the respiratory mechanism with a description of a new method of diagnosis (thesis) .

Uppsala, Sweden: Akademiska-sjukhuset.

Venz S, Dermann K. 1984.

Einfluß von Abbindezeit und Politur auf die Festigkeit und das Korrosionsverhalten zahnärztlicher Amalgame.

Dtsch zahnärztl Z, 39:360-363.

Vimy MJ, Hooper DE, King WW, Lorscheider FL. 1997.

Mercury from maternal „silver“ tooth fillings in sheep and human breast milk. A source of neonatal exposure.

Biol trace elem res feb, 56(2):143-152.

Vimy MJ, Lorscheider FL. 1985.

Serial Measurements of intra-oral air mercury: Estimation of daily dose from dental amalgam.

J dent res, 64(8):102-1075.

Waldmeier M, Greener EH, Mezger P, Vrihoef MA. 1987.

Effect of mucin on the electrochemical behavior of amalgam [Abstract].

J dent res, 66 Spec Iss: 291 Abstract 1476.

Wassermann O, Weitz M, Alsen-Hinrichs C. 1997.

Kieler Amalgam-Gutachten 1997 : medizinische, insbesondere toxikologische Feststellungen im Zusammenhang mit einer Rechtlichen Beurteilung der Herstellung und des Vertriebs von Amalgam als Material für Zahnfüllungen.

Zweite Auflage. Kiel: Inst.-Für-Toxikologie.

Weiland M, Borrmann St, Nossek H, Heise D. 1988a.

Experimentelle Untersuchungen zur Oberflächenbearbeitung von Dentalamalgamen

1. Mitteilung: Oberflächenrauheit von Germadent®-Amalgam nach verschiedenen Bearbeitungsvarianten.

Stomatol DDR, 38:577-583.

Weiland M, Borrmann St, Hunger HJ, Nossek H, Heise D. 1988b.

Experimentelle Untersuchungen zur Oberflächenbearbeitung von Dentalamalgamen

2. Mitteilung: Elementeanalyse an der Oberfläche verschiedener Amalgame.

Stomatol DDR, 38:758-763.

Weiland M, Nossek H. 1991.

Toxikologische Einschätzung der Freisetzung von Amalgambestandteilen bei Immersionstesten.

Dtsch zahnärztl Z, 46(8):547-550.

Weiland M, Werner H. 1990.

Elektrochemische Untersuchungen zum Einfluß der Oberflächenbearbeitung auf die Korrosion verschiedener Dentalamalgame

I. Mitteilung: Korrosionspotential, Korrosionsgeschwindigkeit und Durchbruchpotential.

Stomatol DDR, 40:103-105.

Weiner JA, Nylander M. 1995.

An estimation of the uptake of mercury from amalgam fillings based on urinary excretion of mercury in Swedish subjects.

Sci total environ, 168(3):255-265.

Wiemann A, Strietzel R, Viohl J. 1994.

Korrosion von Amalgam in Abhängigkeit von der Zeit und dem Stopfdruck.

Dtsch zahnärztl Z, 49(5):367-369.

Wilhelm M, Dünninger P, Rüppel R, Tony HP, Wilms K, Klaiber B. 1991.

Einfluß von Amalgam auf Zellen des Immunsystems.

Dtsch zahnärztl Z, 46(8):544-547.

Willershausen-Zönnchen B, Zimmermann M, Defregger A, Schramel P, Hamm G. 1992.

Mercury concentration in the Mouth mucosa of patients with amalgam fillings.

Deutsch med Wochenschr, 117(46): 1743-1747.

Wirz J. 1991.

Die unbegründete Angst vor Amalgam.

Swiss dent, 13:9-18.

Wirz J, Leupin T, Schmidli F. 1990.

Moderne Amalgame – Politur und Korrosionsverhalten im in-vitro-Versuch.

Die Quintessenz, 7:1219-1227.

Wirz J, Mazenauer B, Castagnola L. 1978

Gamma-2-freie Amalgame: Einfluss der Verarbeitungstechnik (Trituration) auf die physikalischen Testwerte.

Schweiz Monatsschr Zahnheilk, 88(4):403-416.

Witzel A 1899.

Das Füllen der Zähne mit Amalgam.

Berlinischer Verlag-Anstalt Berlin.

Wolff M, Osborne JW, Hanson AL. 1983.

Mercury toxicity and dental amalgam.

Neurotoxicol, 4(3):201-204.

Zander D, Ewers U, Freier I, Brockhaus A. 1992a.

Untersuchungen zur Quecksilberbelastung der Bevölkerung

III. Quecksilbermobilisation durch DMPS (Dimaval®) bei Personen mit und ohne Amalgamfüllungen.

Zentralbl Hyg Umweltmed, 192(5):447-454.

Zander D, Ewers U, Freier I, Brockhaus A. 1992b.

Untersuchungen zur Quecksilberbelastung der Bevölkerung

IV. Quecksilberbelastung von Zahnärztrn, Zahnärztinnen und Zahnarthelferinnen.

Zentralbl Hyg Umweltmed, 193(4):318-328.

9 Anhang

Lebenslauf

Name, Vorname: Jendrek, Martin
Geburtsdatum: 08.01.1979
Geburtsort: Gera

Vater: Dieter Jörg Jendrek
Diplomingenieur
Mutter: Rosemarie Jendrek, geb. Sichtung
Diplomstomatologin

Familienstand: ledig
Anschrift: Pennickental 33
07749 Jena

Schulbesuch:

Allgemeinbildende September 1985 bis Februar 1987, POS Ernst Thälmann, Jena
Polytechnische Oberschule: Februar 1987 bis Februar 1990, Deutsche Botschaftsschule Moskau
Februar 1990 bis September 1991, POS Ernst Thälmann, Jena
Gymnasium: September 1991 bis Juni 1997, 4. Staatliches Gymnasium Jena

Wehersatzdienst: Oktober 1997 bis Oktober 1998, Klinikum der Friedrich-Schiller-Universität Jena

Studium der Zahnmedizin: Oktober 1998 bis März 2004, Friedrich-Schiller-Universität Jena
Zahnärztliche Vorprüfung: März 2001, Gesamtergebnis „gut“
Zahnärztliche Prüfung: Dezember 2003, Gesamtergebnis „gut“
Dissertationsschrift: Oktober 2005 im Institut für Arbeits-, Umwelt- und Sozialmedizin und -hygiene der Friedrich-Schiller-Universität Jena
(Direktor und Betreuer Prof. Dr. Dr. med. R. Schiele)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich im Besonderen Herrn Professor Dr. Reiner Schiele für die freundliche Überlassung dieses Themas, seine bereitwillige Hilfe und die schnelle Durchsicht dieser Arbeit herzlich danken.

Für die Hilfe bei der Lösung von wissenschaftlichen Problemen sowie für Ratschläge und Auskünfte bei der experimentellen Durchführung dieser Arbeit habe ich Herrn Dr. rer. nat. Michael Erler zu danken, er stand mir bei allen Problemen zur Seite. Mit der Durchführung der Atom-Absorptions-spektrometrischen Messung der Proben ermöglichte mir Frau Müller die schnelle und korrekte Erhebung der Messwerte.

Viel Dank gilt auch Herrn Professor Dr. med. dent. Eike Glockmann und seinen Mitarbeitern, die mir schnell und unkompliziert Geräte und Materialien für die Herstellung und Reinigung der Prüfkörper zur Verfügung stellte.

Des Weiteren danke ich Herrn Ditze und den Mitarbeitern der Zentralwerkstadt der Friedrich-Schiller-Universität Jena für die Herstellung und Wartung der Putzmaschine.

Weiterhin gilt es, der Firma Ivoclar Vivadent für die Zurverfügungstellung von nicht unerheblichen Mengen des Amalgams „Amalcap Plus®“ zu danken.

Nicht zuletzt möchte ich auch meiner Mutter für die Beschaffung von Zahnbürsten und der Bereitstellung ihrer Praxis für technische Arbeiten danken. Auch meiner Familie gebührt Dank für den mir zugesprochenen Mut und ihre Unterstützung, insbesondere meiner Freundin, die viel gemeinsame Zeit geopfert hat.

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben:

Prof. Dr. med. Rainer Schiele,
Prof. Dr. med. dent. Eike Glockmann,
Dr. rer. nat. Michael Erler,
Elke Müller,

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Jena, den

.....